

ν_e

ν_μ

ν_τ

Premio Nobel de Física de 2015: neutrinos, las partículas camaleónicas

Sergio Pastor Carpi
(Instituto de Física Corpuscular)

Ciclo Hablemos de Física
Universidad Complutense de Madrid
30 noviembre 2015

EXCELENCIA
SEVERO
OCHOA

IFIC
INSTITUT DE FÍSICA
CORPUSCULAR

ASTROPARTICLES
Astroparticles and High Energy Physics Group



VNIVERSITAT
ID VALÈNCIA



CSIC

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

Hace menos de dos meses....



Takaaki Kajita



Arthur B. McDonald

El Premio Nobel de Física de 2015 se otorga conjuntamente a **Takaaki Kajita** y **Arthur B. McDonald** *“por el descubrimiento de las oscilaciones de neutrinos, que demuestran que los neutrinos tienen masa”*

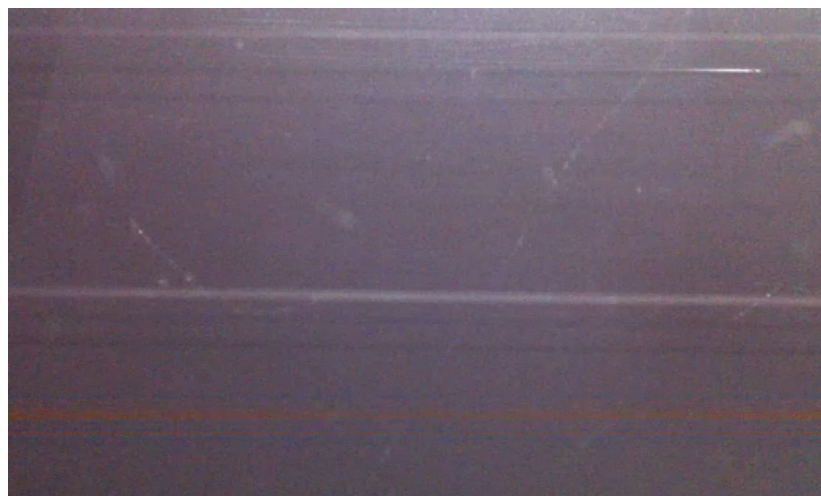
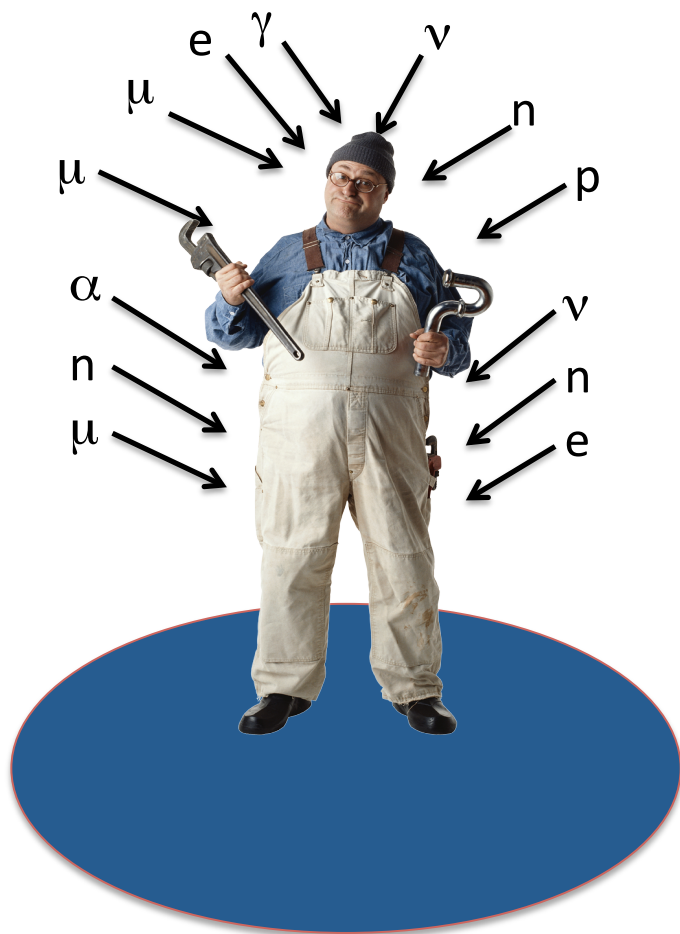
Introducción

Partículas: la radiación ambiental

Estamos expuestos a **radiactividad ambiental**, es decir, a partículas que proceden de:

- ✓ **La Tierra** (desde su formación)
- ✓ **El espacio** (rayos cósmicos)
- ✓ **Aire, comida, materiales** (ej. radón)

Una persona es **atravesada** por unos 100.000 rayos cósmicos cada hora



Cámara de niebla de difusión

ν

Neutrinos: algunos datos

Una persona es **atravesada** cada segundo por

- unos **600 billones de neutrinos del Sol**
- del orden de **50.000 millones de neutrinos** creados por la **radioactividad natural**
- unos **10.000 millones de neutrinos de reactores nucleares** (dependiendo de la distancia a la que nos encontremos)
- Algunos **miles de neutrinos secundarios** de la **radiación cósmica**

Además:

- El volumen de una persona contiene unos **10 millones de neutrinos remanentes del Big Bang**
- Emitimos unos **4000 neutrinos s^{-1}** de la desintegración del ^{40}K de nuestro cuerpo



**Hay muchos neutrinos (¡están por todas partes!)
pero no se “hablan” con la materia normal...**

Neutrinos = partículas fantasma

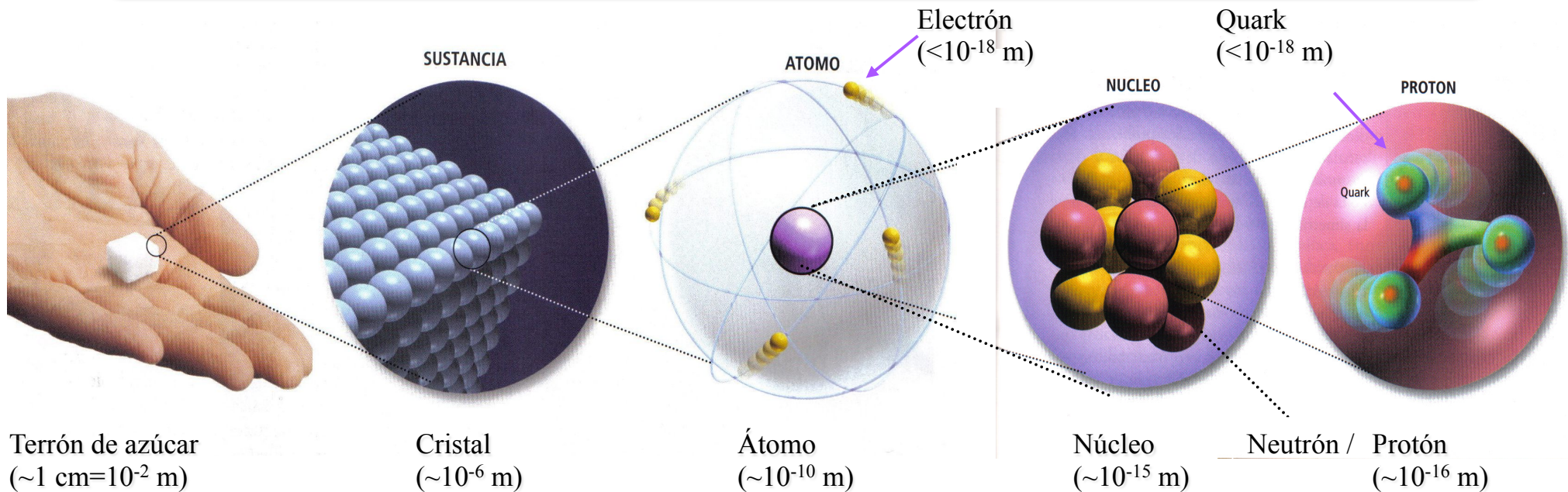


Quizás no sean los únicos...



Neutrinos: partículas... fantasma

Los neutrinos son partículas sin carga eléctrica que **NO** forman parte de la materia *ordinaria*



**¿Por qué son tan importantes?
(al menos para los físicos)**

¿Por qué nos interesan los neutrinos?

... para todo el mundo,

sin neutrinos

- las **estrellas no brillarían**
- no habría **átomos más complejos** que el **hidrógeno**

... para los físicos,

los neutrinos

- pueden ofrecernos información sobre **las leyes fundamentales de la Naturaleza** y la **evolución del Universo**
- sirven como “**mensajeros**” de **objetos y fuentes astrofísicas**

¿De dónde vienen los neutrinos?

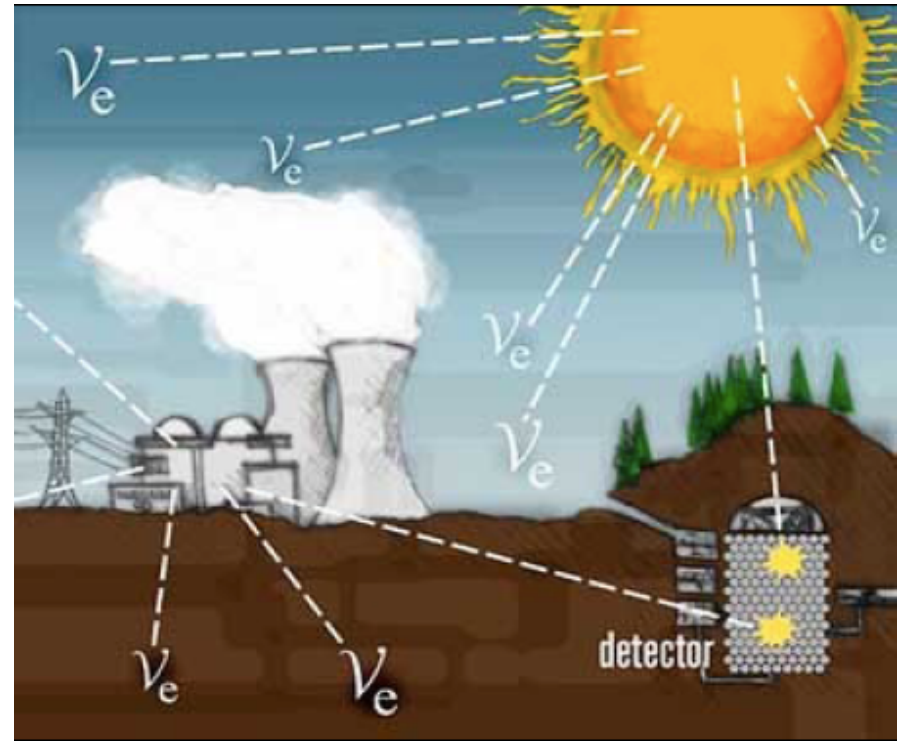
✓ Reactores Nucleares			Sol ✓
✓ Aceleradores de Partículas			Supernovas (Estrellas en explosión) SN 1987A ✓
✓ Atmósfera Terrestre (Rayos cósmicos)			Aceleradores en Fuentes Astrofísicas ✓?
✓ Corteza Terrestre (Radioactividad Natural)			Origen del Universo (Hoy $330 \nu/\text{cm}^3$) Evidencia Indirecta

Detectando los neutrinos

La extrema debilidad de la interacción de los neutrinos hace que sea muy difícil **detectarlos** y **estudiarlos**

Se necesita:

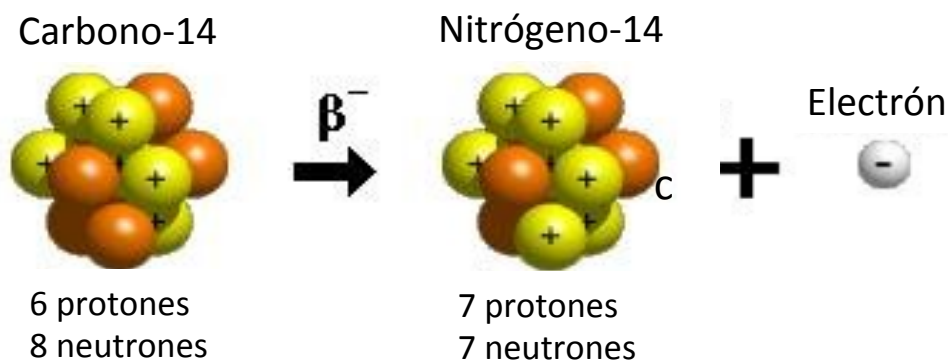
- Fuentes de neutrinos muy intensas
- Mucha paciencia (tiempo)
- Grandes detectores
- Poco ruido ambiental (exp. subterráneos)



La historia del neutrino

El descubrimiento del neutrino

Experimentos de James Chadwick (1913), entre otros, sobre la desintegración radiactiva de núcleos atómicos



Proceso que emite **radiación β** (electrones): detectados con **energía continua**

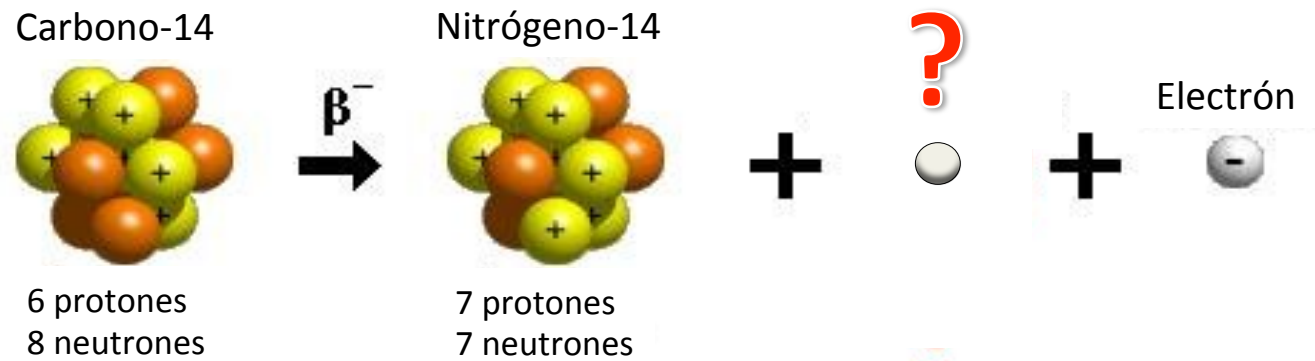
Pero deberían tener una **energía fija** por **conservación de energía y momento en el proceso**

Evidencia experimental desde finales de 1920s...

...uno de los padres de la teoría cuántica, **Niels Bohr**, se atrevió a sugerir que **quizás la energía no se conservaba en las desintegraciones nucleares.**

El descubrimiento del neutrino

La solución de **Wolfgang Pauli** (1931): en una famosa carta dirigida a unas “estimadas damas y caballeros radiactivos” postulaba como *solución desesperada* la **existencia de una nueva partícula**



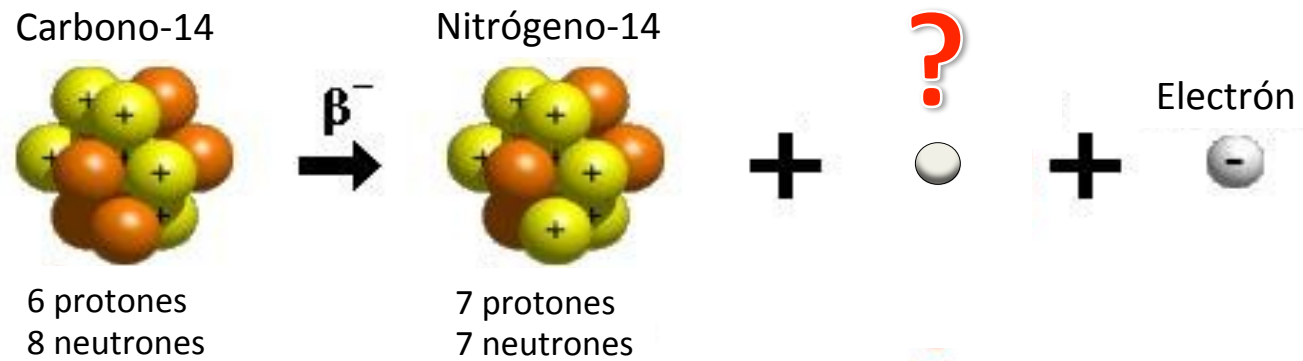
“Dear radioactive ladies and gentlemen,

I have come upon a desperate way out regarding ... [some fairly obscure data], as well as to the continuous β -spectrum, in order to save ... The energy law. To wit, the possibility that there could exist in the nucleus **electrically neutral particles** which I shall call **neutrons**, which have spin 1/2 and satisfy the exclusion principle and which are further distinct from light-quanta in that they do not move with light velocity. ... The continuous β -spectrum would then become understandable from the assumption that in β -decay a neutron is emitted along with the electron, in such a way that the sum of the energies of the neutron and the electron is constant.”



El descubrimiento del neutrino

La solución de **Wolfgang Pauli** (1931): en una famosa carta dirigida a unas “estimadas damas y caballeros radiactivos” postulaba como *solución desesperada* la **existencia de una nueva partícula**



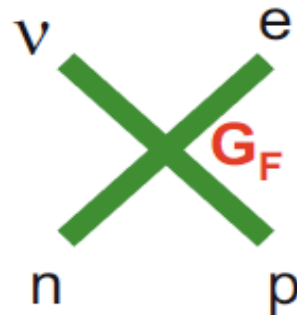
La **nueva partícula** **interaccionaría muy débilmente con la materia**, explicando por qué no había sido observada, y se llevaría parte de la energía de la desintegración, explicando por qué el e^- tenía menos energía de la esperada.

Primera propuesta de **nueva partícula** que **NO** forma parte de la materia ordinaria. Pauli escribe en su diario: *“Hoy he hecho algo que ningún físico teórico debería hacer en su vida: he predicho algo que nunca se detectará experimentalmente”*

Enrico Fermi y el neutrino

Enrico Fermi (1934) propone una teoría general para explicar los **procesos de desintegración β** : la teoría de las **interacciones débiles**

Nace el **NEUTRINO**
(italiano: “il piccolo neutro”, el pequeño neutro)

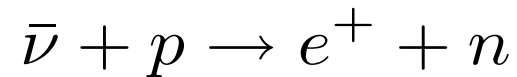
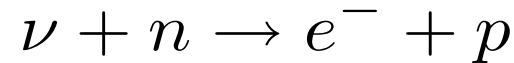


Primera forma de interacción sin análogo clásico



Cálculo de la interacción del neutrino

Bethe y Peierls (1934) calculan la **sección eficaz** para los procesos

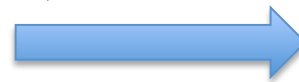


Interacciones de ν / seg = Flujo ($\nu \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) \times Sección Eficaz (cm^2)
 \times Partículas del blanco



Recorrido
libre medio de
los neutrinos:

$$E_{\nu} = 2.5 \text{ MeV}$$

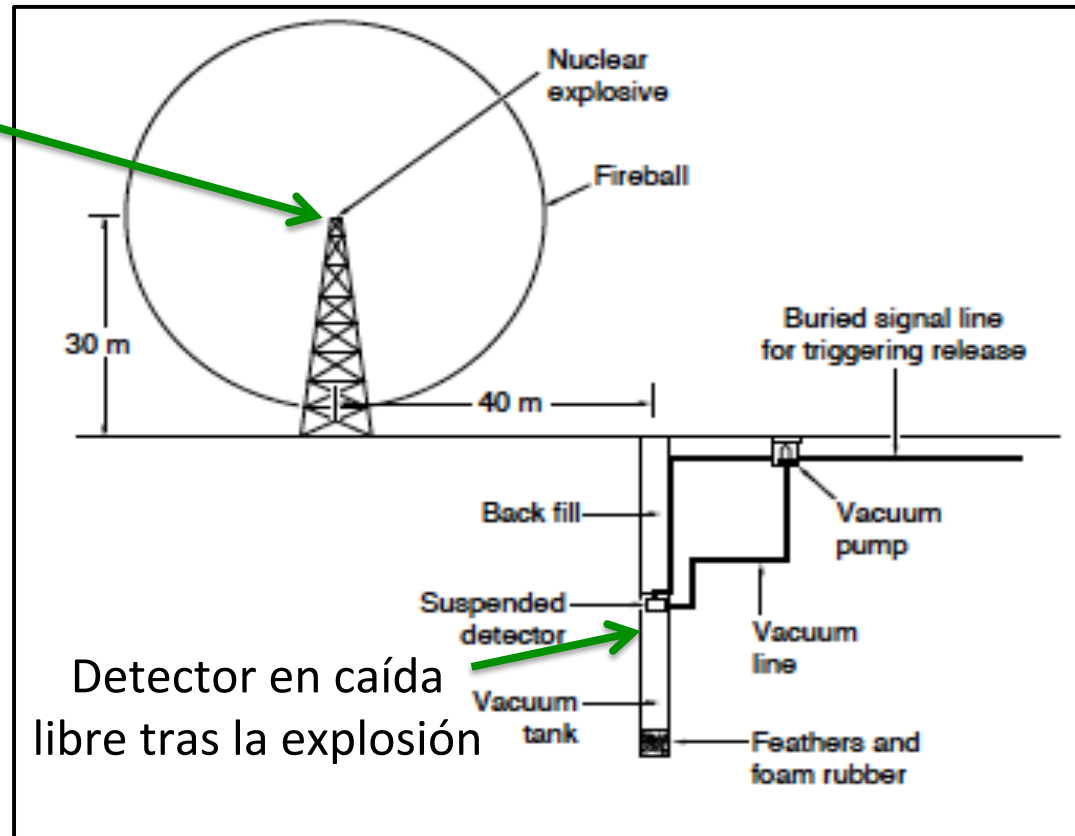


λ_{ν} (agua) \approx espesor del disco de la galaxia
 λ_{ν} (plomo) \approx 1 año-luz

Conclusión: “... *esto significa que, obviamente, no seremos capaces de observar un neutrino.*”

La primera detección de neutrinos

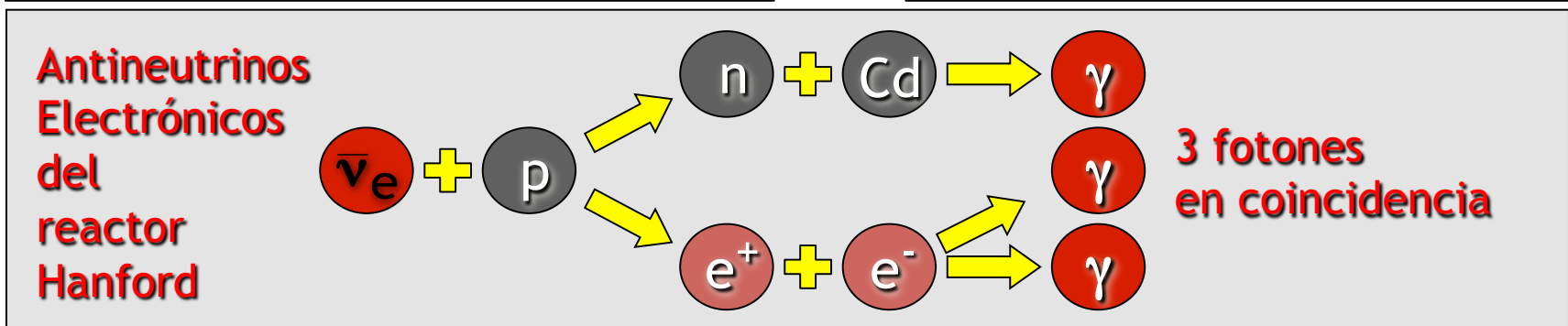
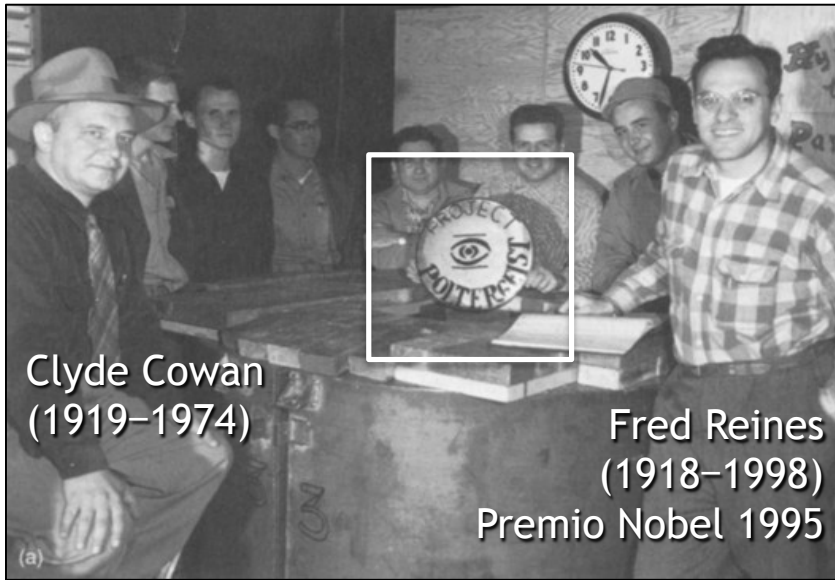
Tras un primer proyecto (1952) para detectar neutrinos en una **explosión nuclear**



La primera detección de neutrinos

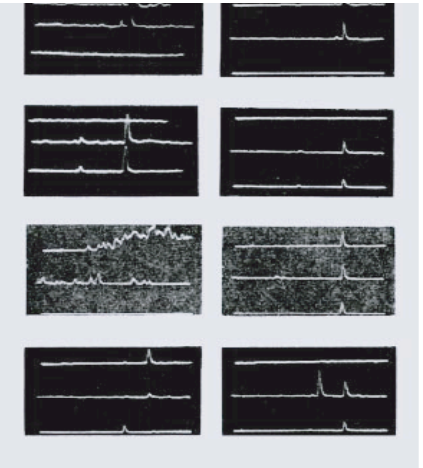
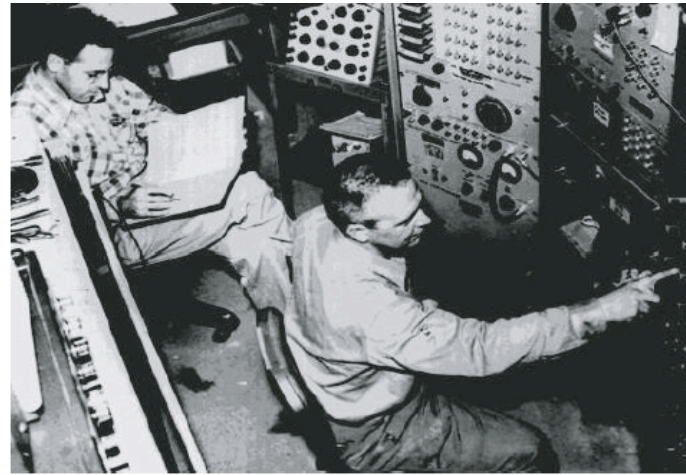
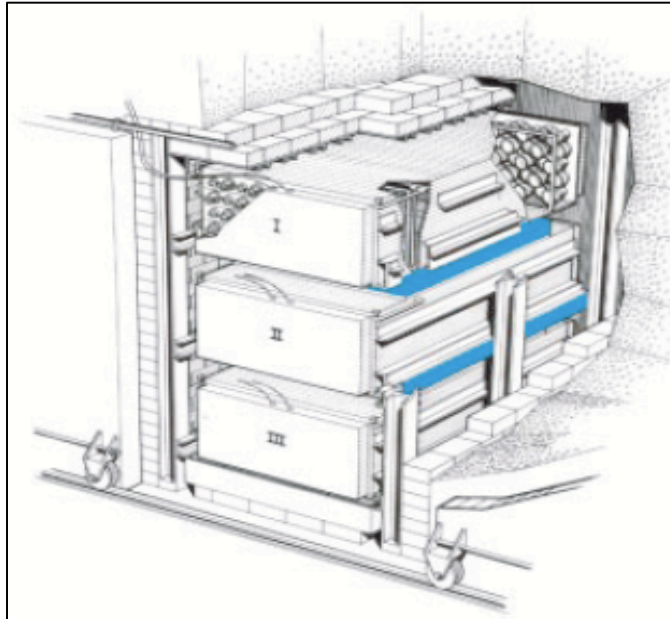
Tras un primer proyecto (1952) para detectar neutrinos en una **explosión nuclear**

1^{er} experimento de detección de neutrinos emitidos por un **reactor nuclear (1953)**



La primera detección de neutrinos

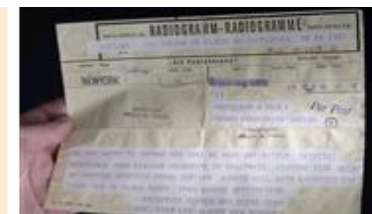
Evidencia de detección de neutrinos en un reactor nuclear (Savannah River, 1956)



Fred Reines
(1918–1998)
Premio Nobel 1995

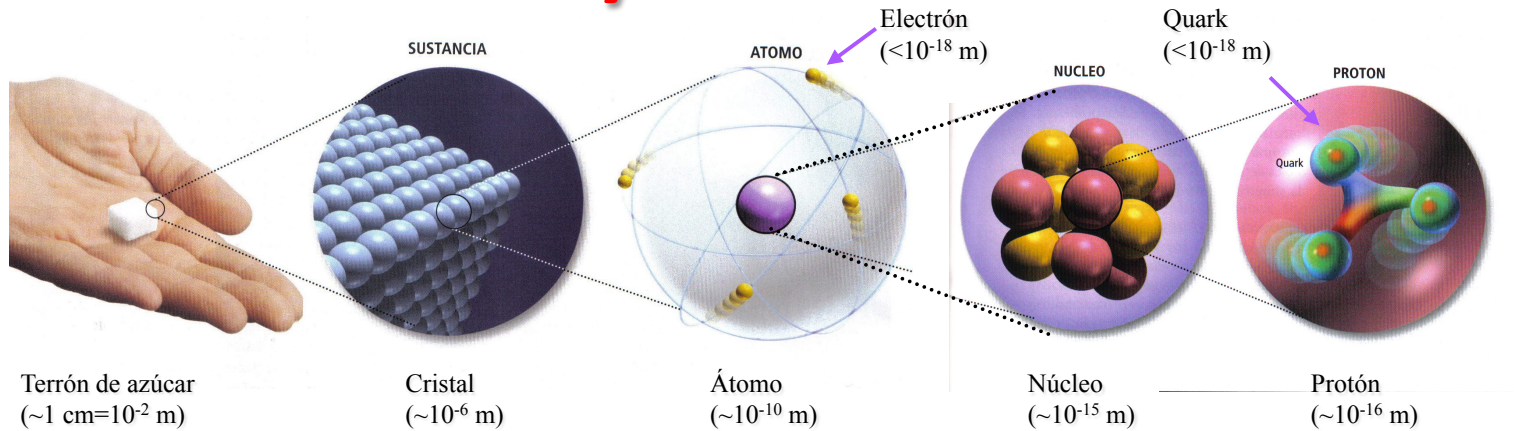
Telegrama a Pauli:

“Estamos encantados de informarle de que, sin duda, **hemos detectado neutrinos** procedentes de los fragmentos de la fisión nuclear al observar el proceso inverso de la desintegración beta en protones...”



Los neutrinos en la Física de Partículas moderna

Los constituyentes de la materia



	Quarks				Leptones			
	Carga +2/3		Carga -1/3		Carga -1		Carga 0	
1ª Familia	Arriba	u	Abajo	d	Electrón	e	Neutrino-e	ν_e
2ª Familia	Encanto	c	Extraño	s	Muon	μ	Neutrino- μ	ν_μ
3ª Familia	Cima	t	Fondo	b	Tau	τ	Neutrino- τ	ν_τ
Gravitación								
Nuclear Débil								
Electromagnetismo								
Nuclear Fuerte								

Es decir...

ν_e ν_μ ν_τ

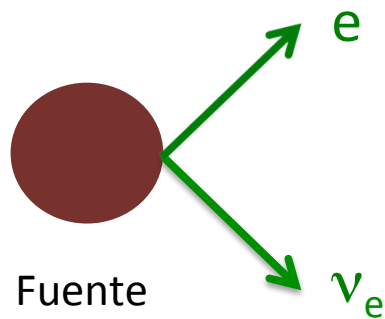
**Existen tres tipos (sabores) de neutrinos
y son partículas muy difíciles de detectar**

Los neutrinos sólo son **sensibles a la interacción débil** (NO tienen carga eléctrica NI color)

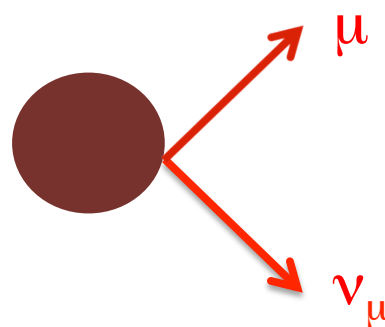
La interacción débil conserva el sabor

La producción de neutrinos en la Naturaleza o el laboratorio siempre tiene lugar con su leptón cargado asociado (e , μ , τ)

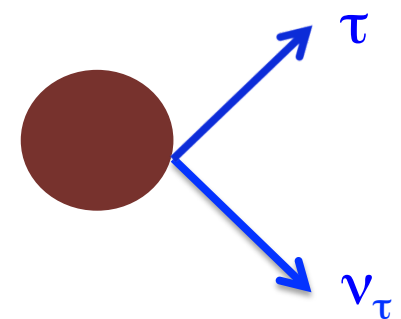
EL SABOR SE CONSERVA



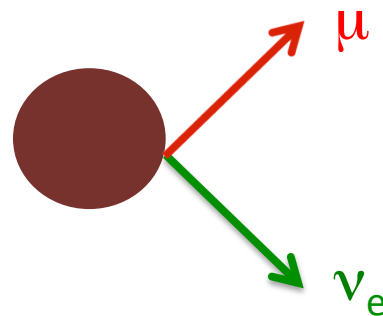
o bien



o bien

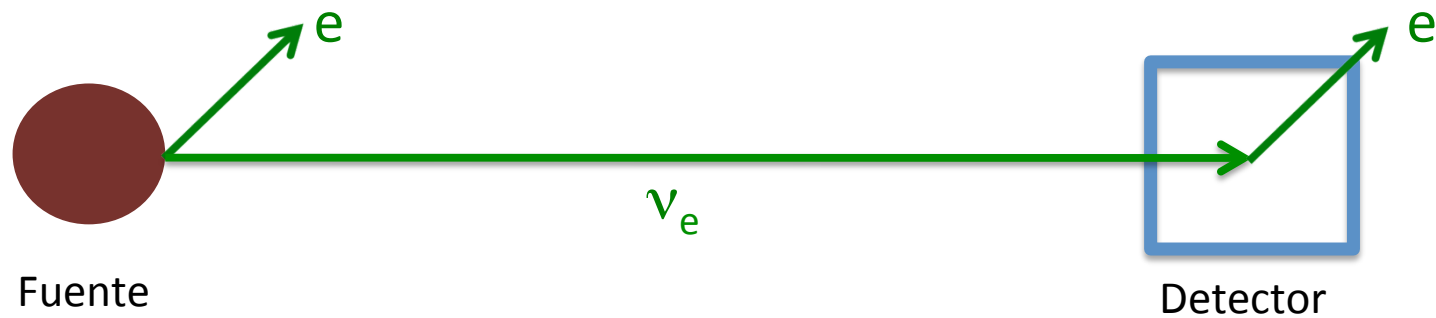


NUNCA

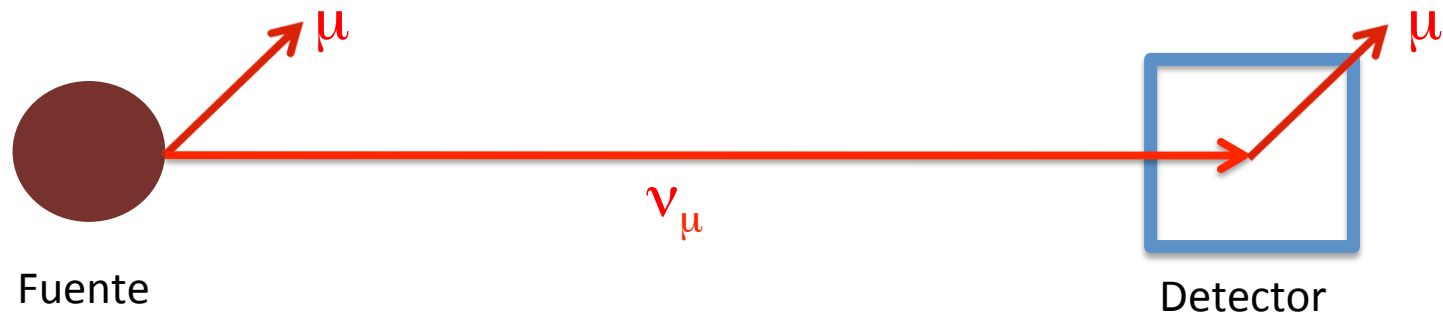


Creación y detección de neutrinos

La detección de neutrinos en experimentos siempre tiene lugar con su **leptón cargado asociado**



LOS SABORES NO SE MEZCLAN



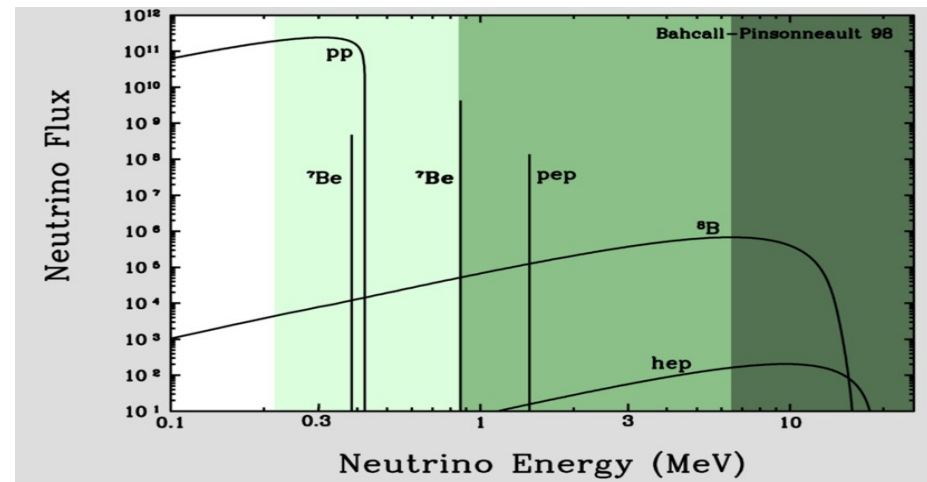
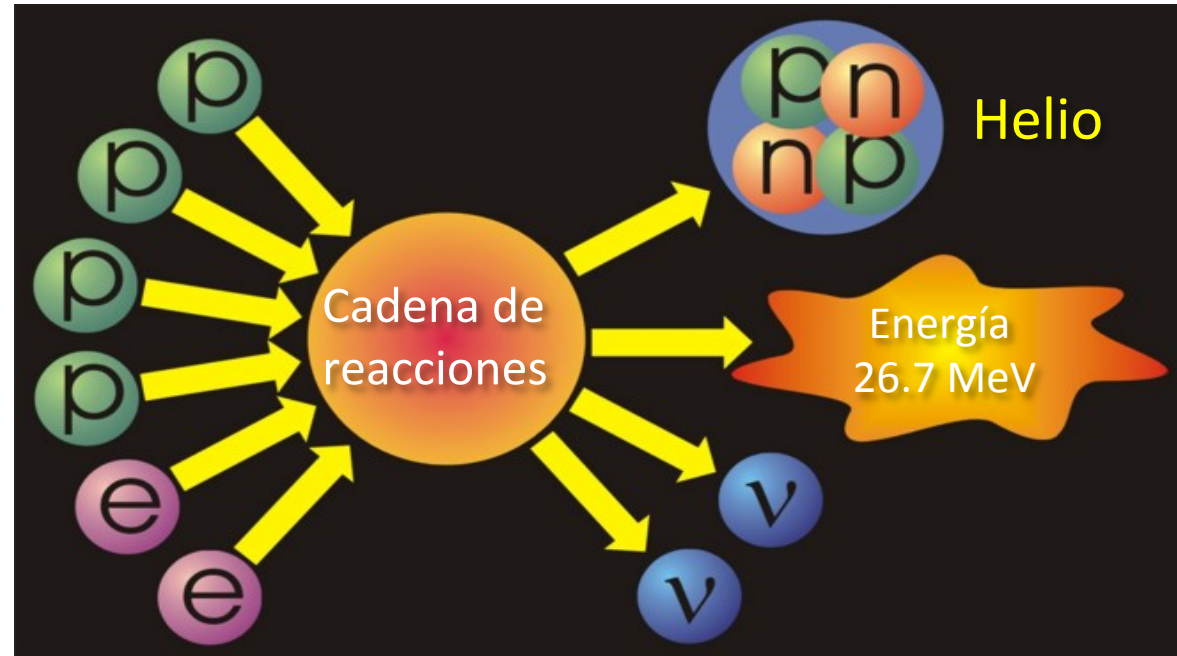
Mirando el Sol bajo tierra

Neutrinos del Sol



Luminosidad solar:
98 % luz (fotones)
2 % neutrinos

Flujo de neutrinos
solares en la Tierra:
 6.6×10^{10} neutrinos
 $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$



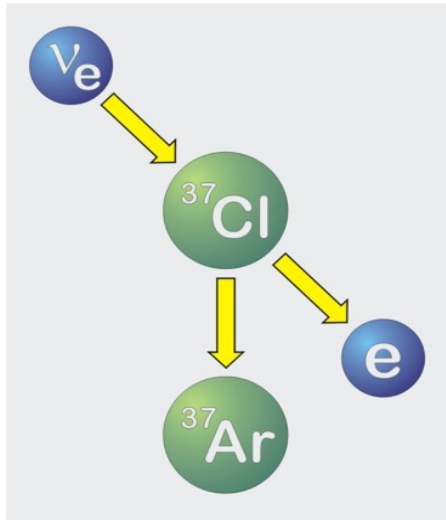
Mirando el Sol bajo tierra



Raymond Davis Jr.

Desde 1968: Primeros resultados de un experimento de **detección de neutrinos solares** (radioquímico con Cl líquido, subterráneo)

- **Mina de oro** de Homestake (Dakota del Sur)
- 615 Tn de percloroetileno (C_2Cl_4)



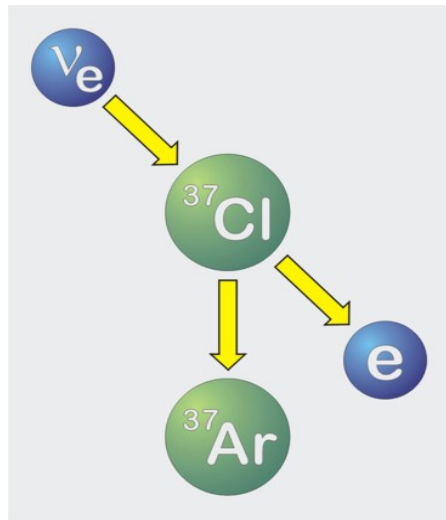
Mirando el Sol bajo tierra



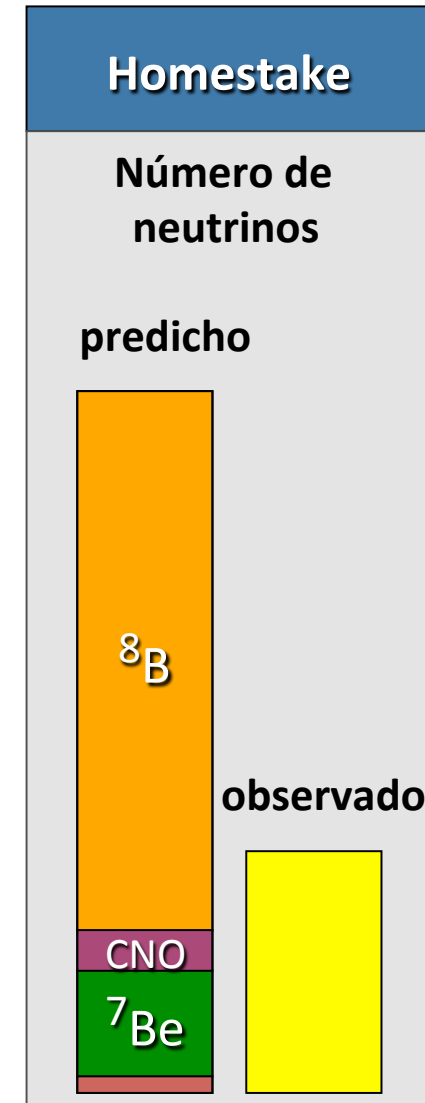
Raymond Davis Jr.
Premio Nobel 2002

Desde 1968: Primeros resultados de un experimento de **detección de neutrinos solares** (radioquímico con Cl líquido, subterráneo)

- **Mina de oro** de Homestake (Dakota del Sur)
- 615 Tn de percloroetileno (C_2Cl_4)

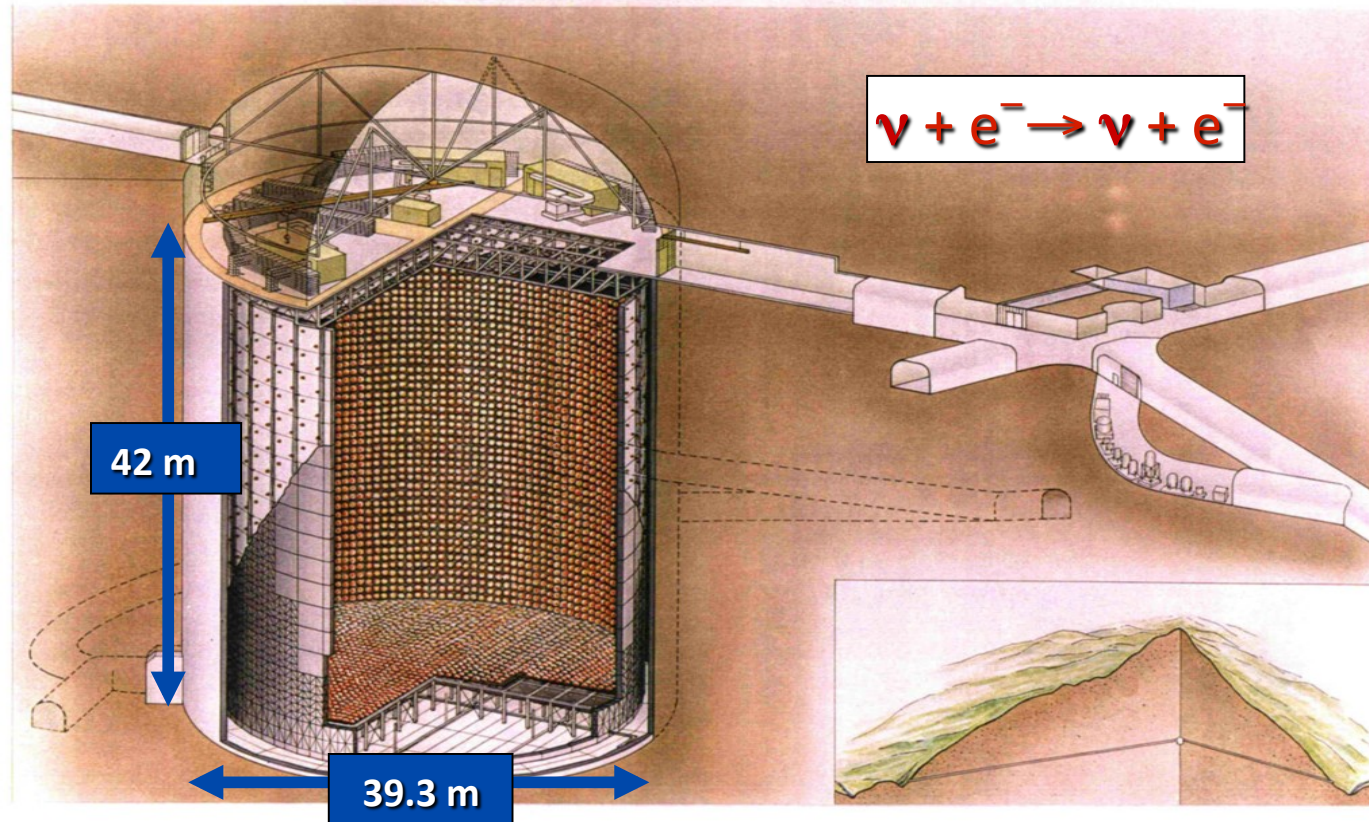


¡¡ “Faltan” la mitad !!
Comienzo del **problema**
de los neutrinos solares



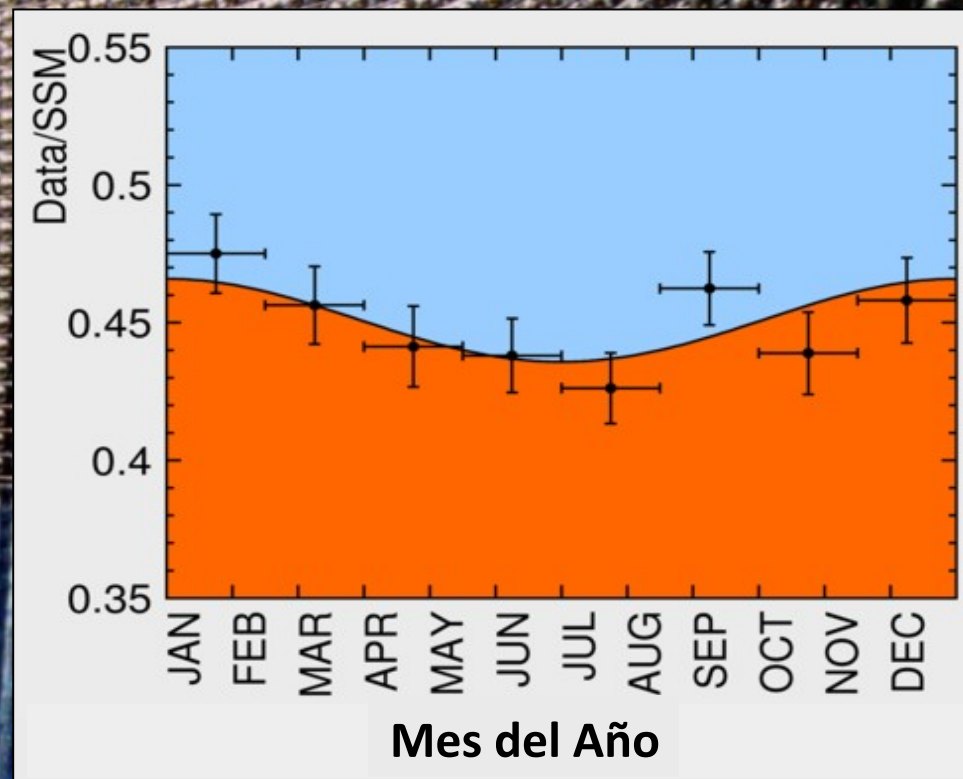
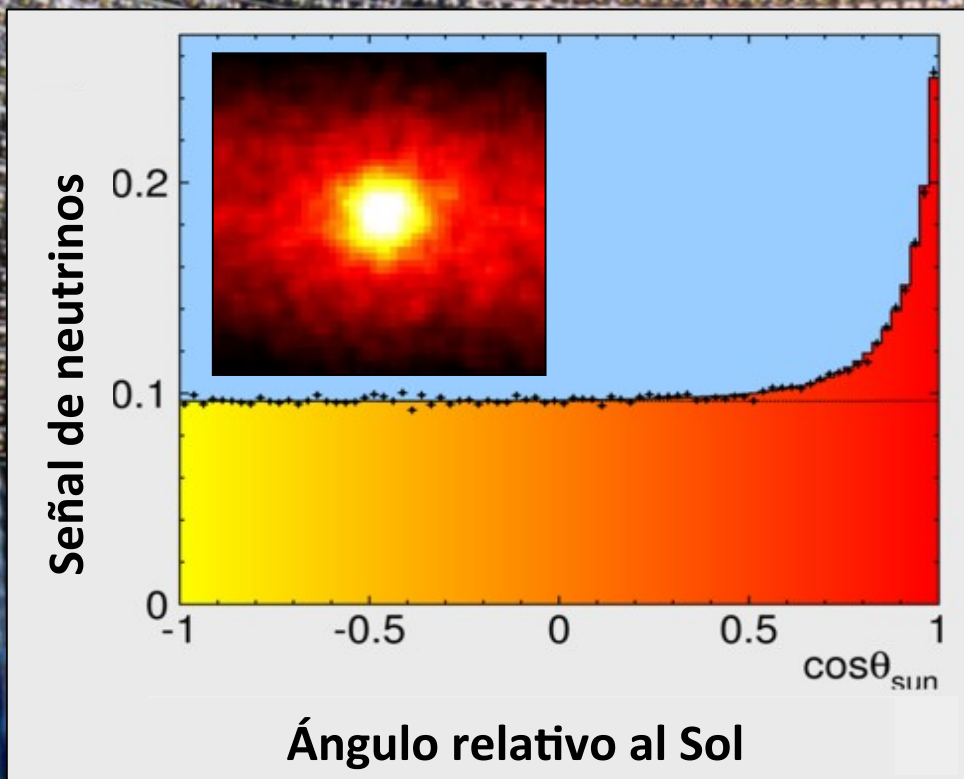
(Super) Kamiokande

1980s Detector de neutrinos **Kamiokande** (después **Super-**) en el interior de una mina de Japón



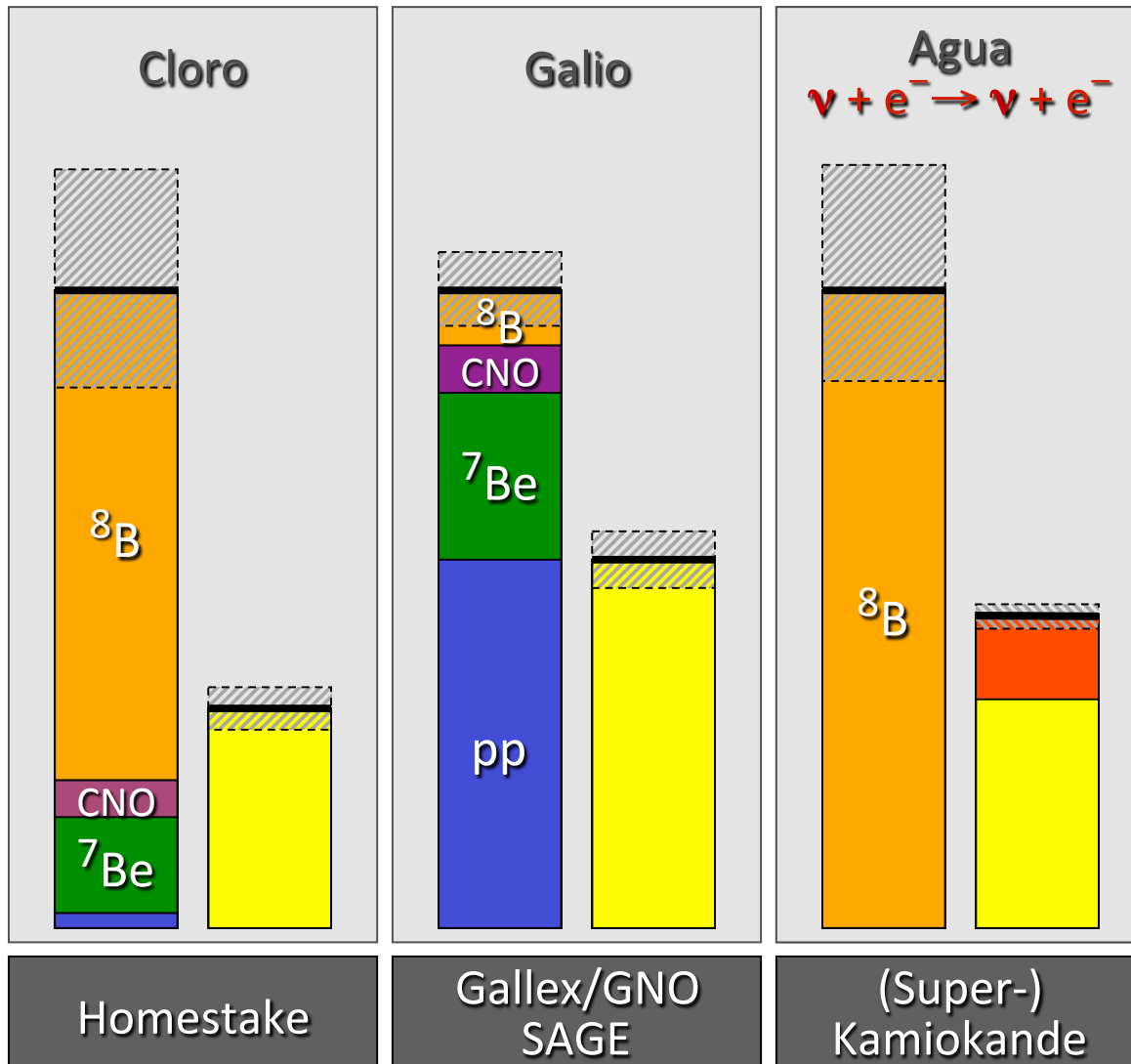
Confirma el **déficit de neutrinos solares** y mide **neutrinos atmosféricos**

Super-Kamiokande: el Sol visto con "luz de neutrinos"



Neutrinos solares: predicción vs observación

Detectores sensibles sólo (o más) a neutrinos electrónicos

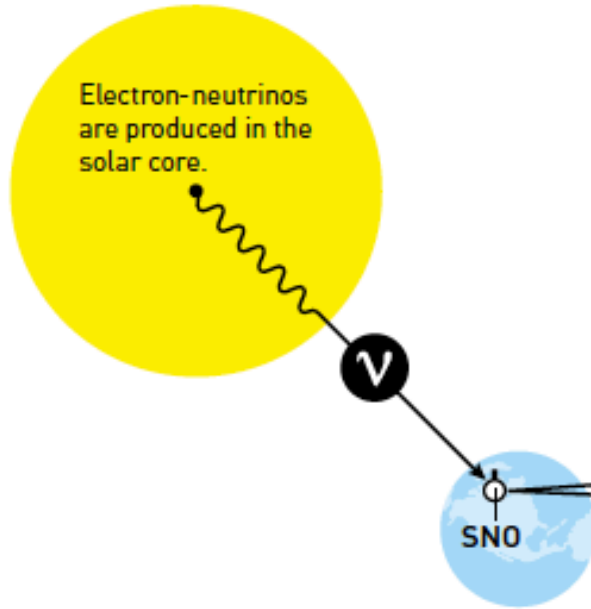


Observatorio de neutrinos de Sudbury (SNO)

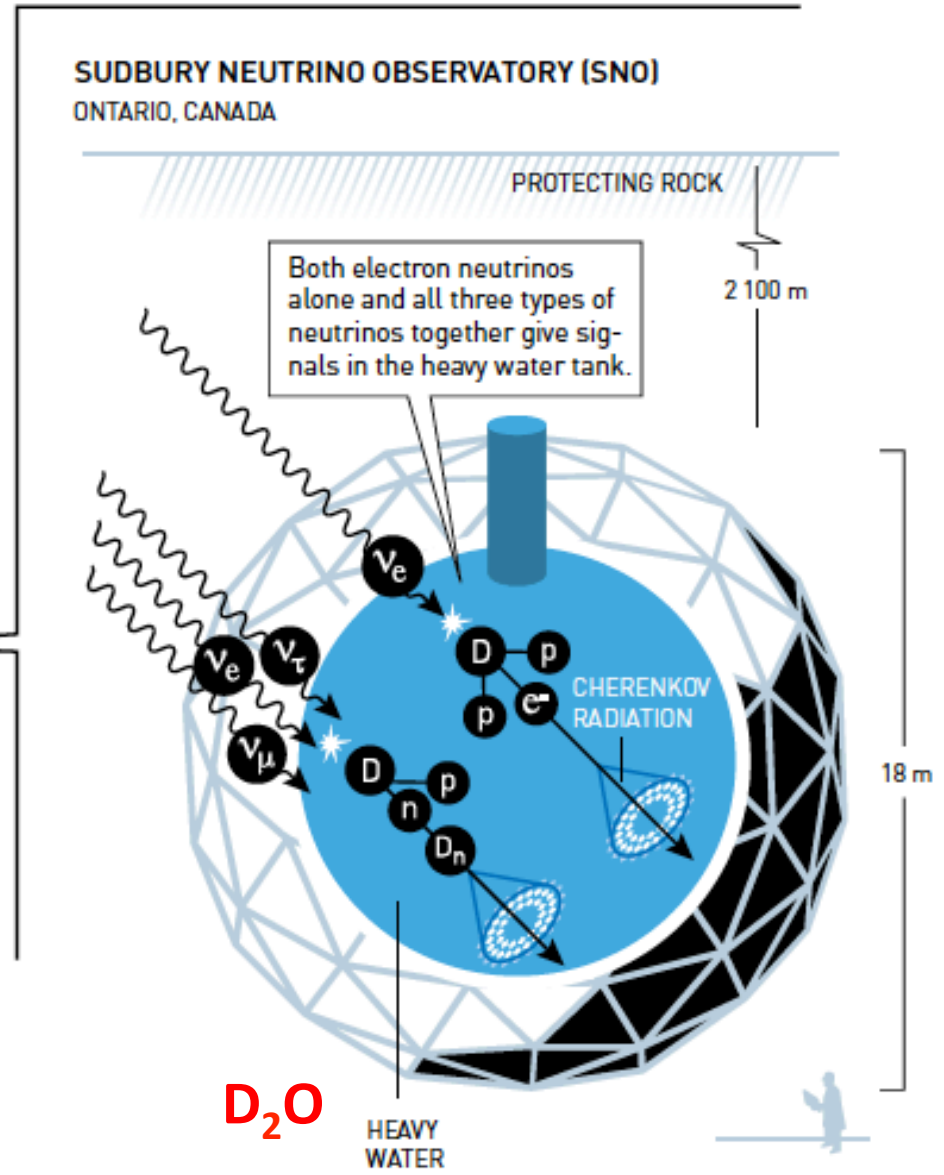
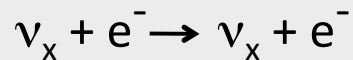
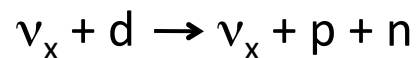
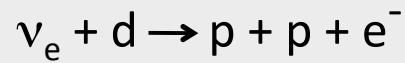


Arthur B. McDonald
Colaboración SNO

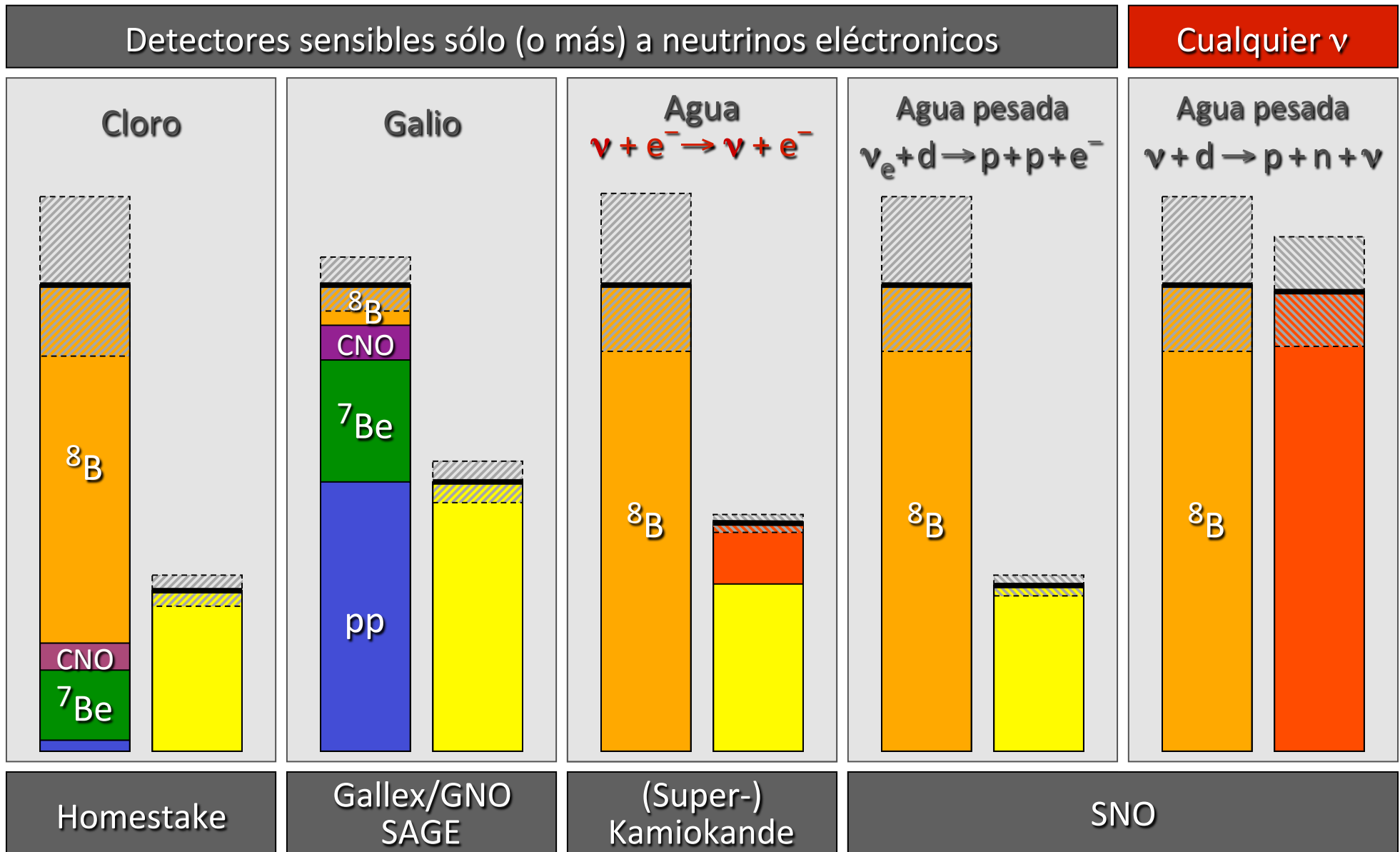
NEUTRINOS FROM THE SUN



Detección de neutrinos en SNO

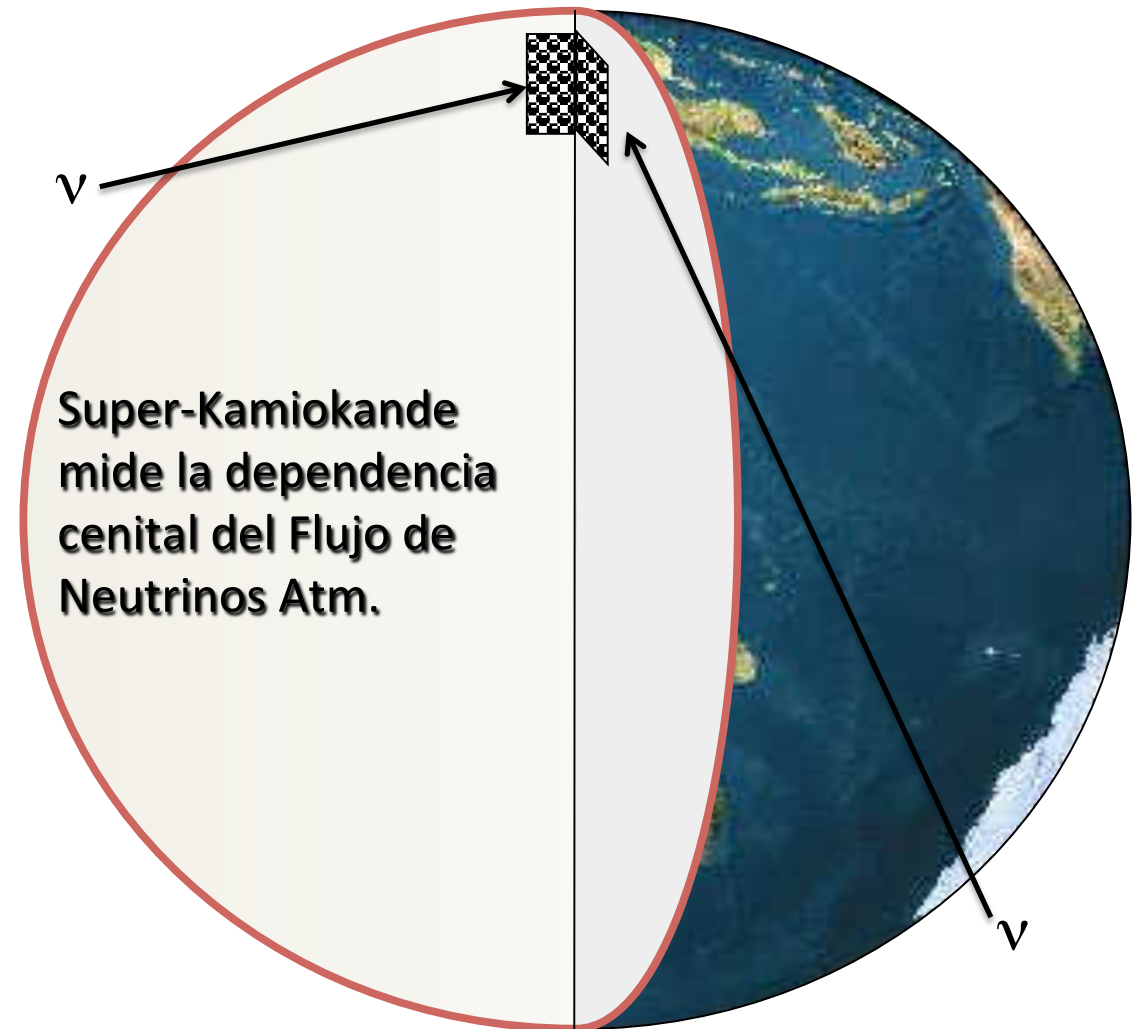
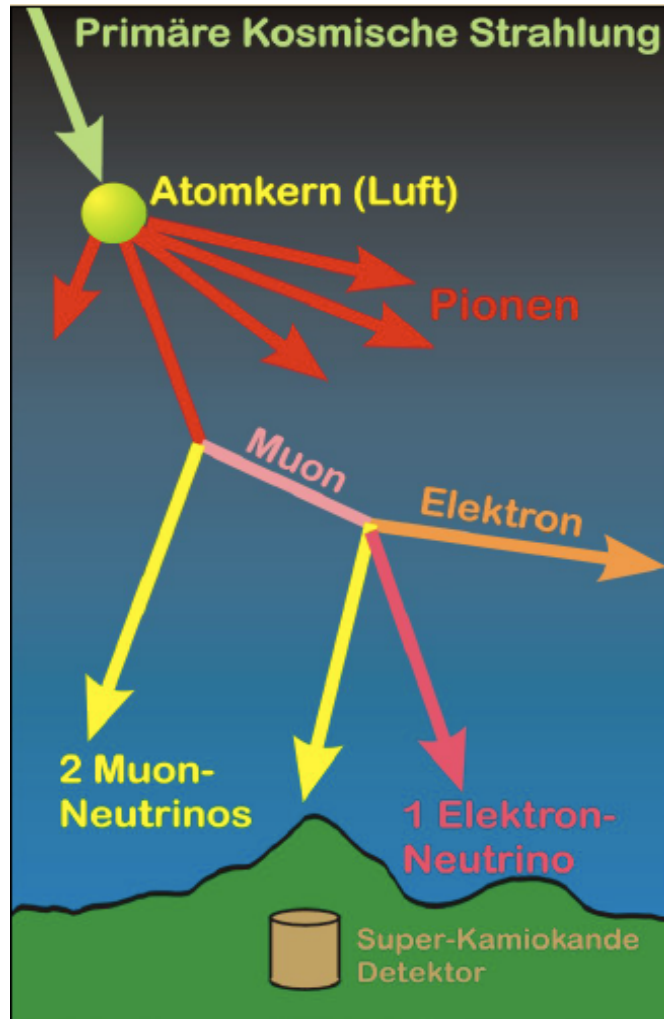


Neutrinos solares: predicción vs observación

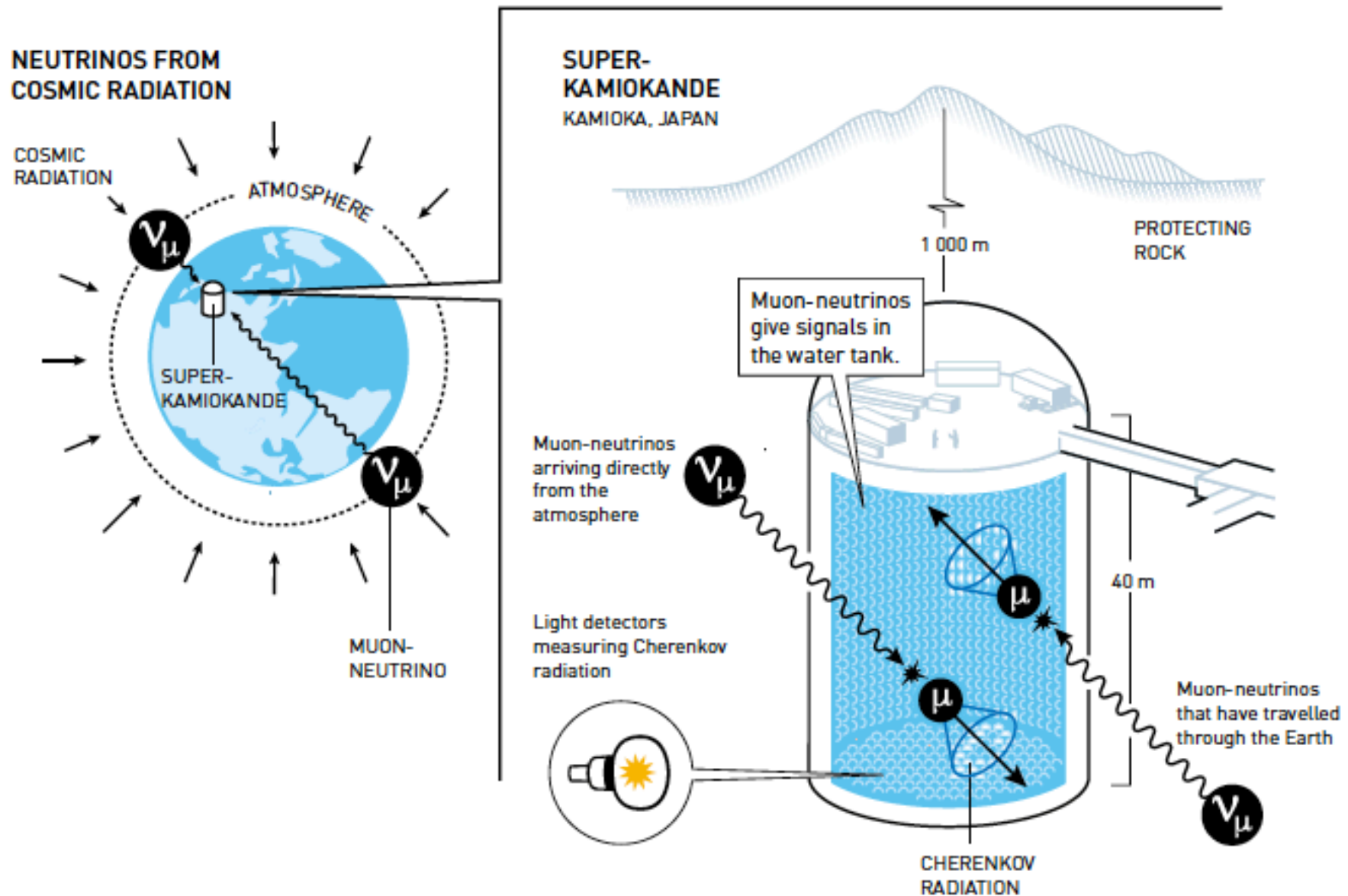


Neutrinos atmosféricos

Neutrinos de energías intermedias (GeV y superiores) originados tras la interacción de rayos cósmicos con la atmósfera terrestre



Neutrinos atmosféricos en SK

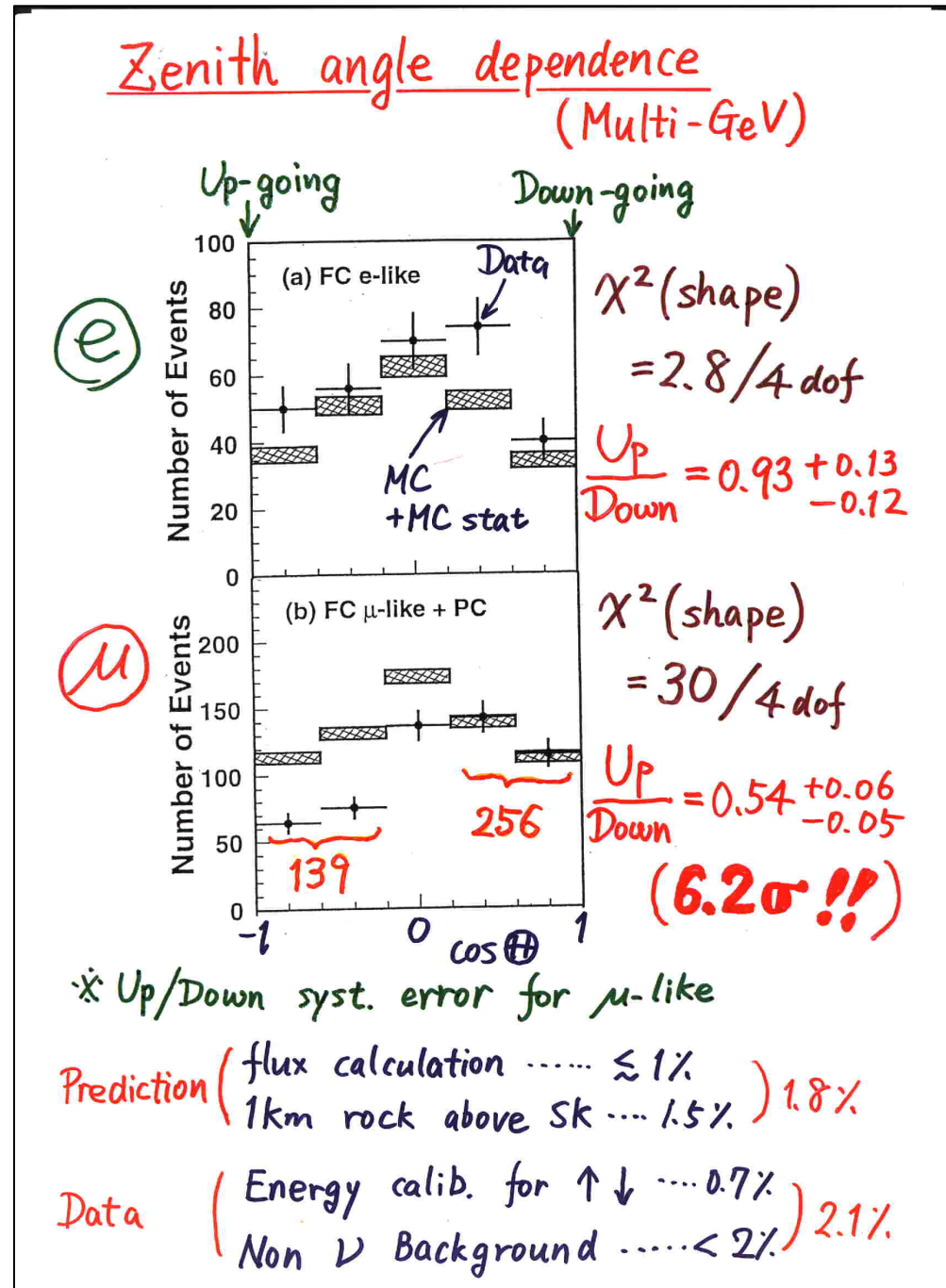


Neutrinos atm. en SK

Primera evidencia experimental del **cambio de sabor** (tipo) de los neutrinos durante su propagación (1998)



Takaaki Kajita
Colaboración Super-Kamiokande

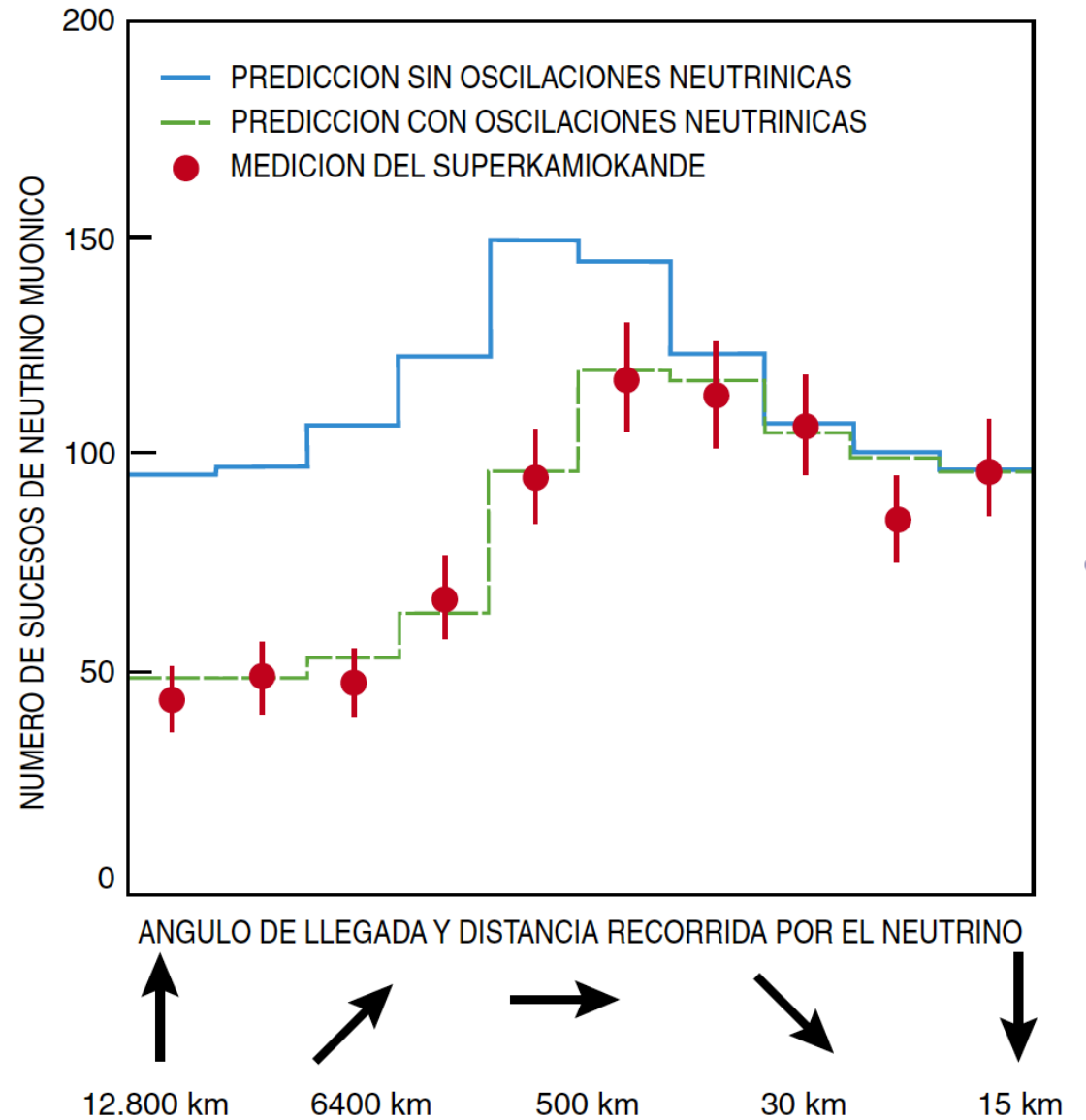


Neutrinos atm. en SK

Primera **evidencia experimental** del **cambio de sabor** (tipo) de los neutrinos durante su propagación (1998)

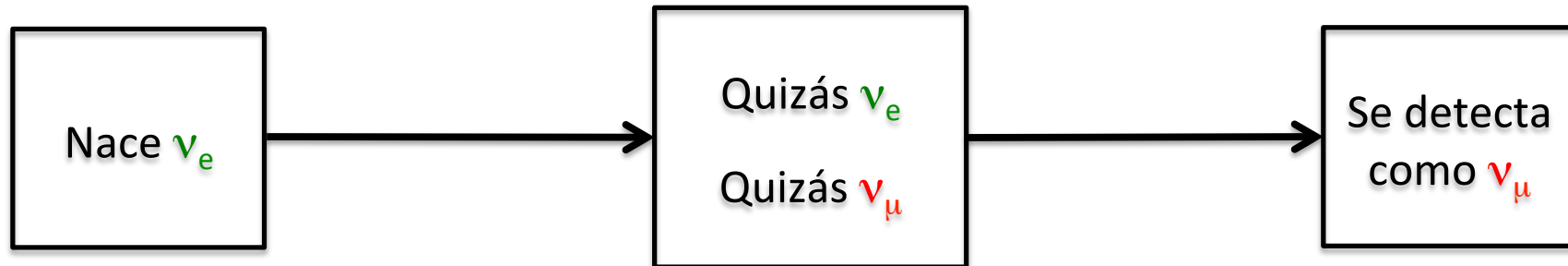
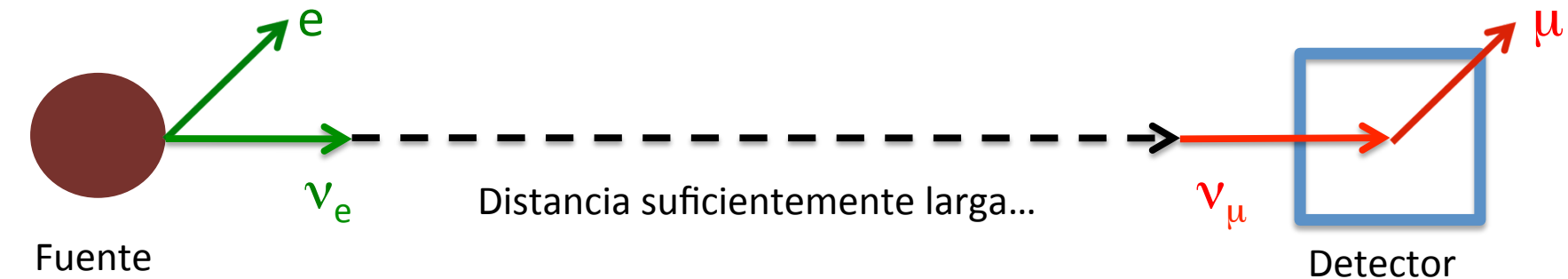


Takaaki Kajita
Colaboración
Super-Kamiokande



¿Conversiones de sabor de los neutrinos?

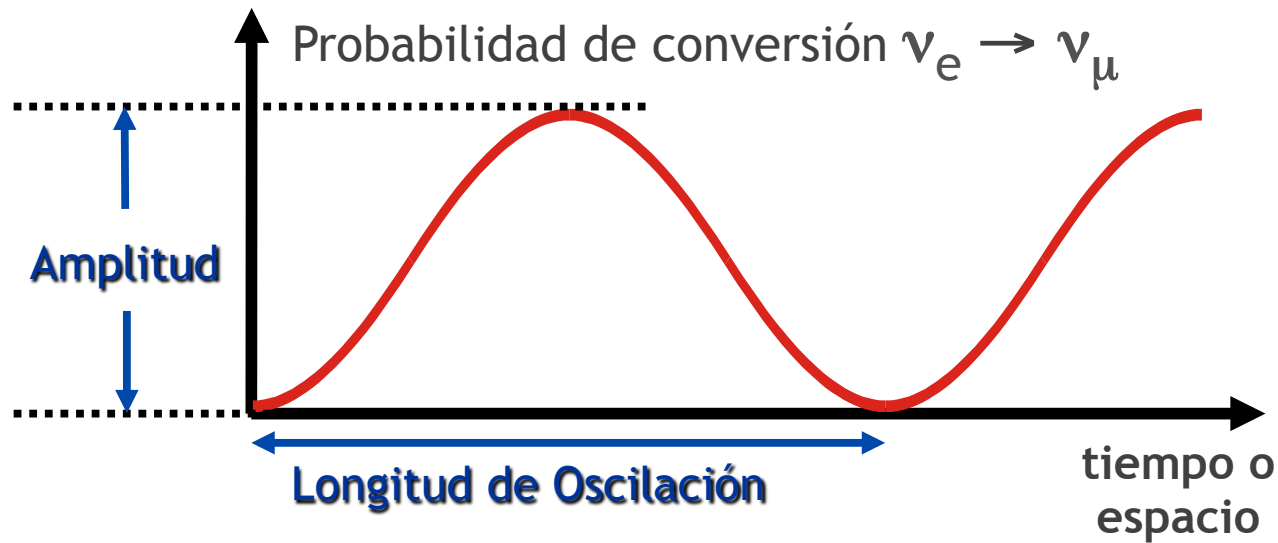
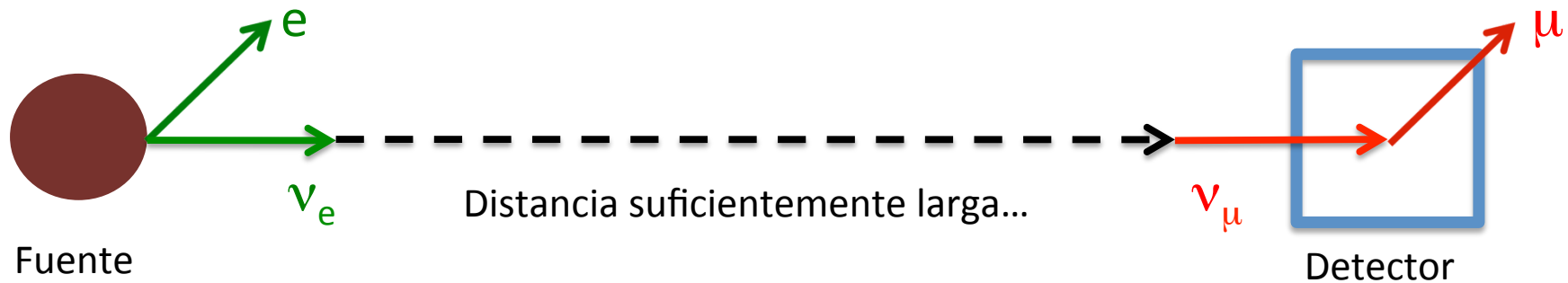
Se observa en ciertos experimentos que **los neutrinos cambian su naturaleza (sabor)** durante su propagación



Se producen y detectan los **neutrinos de sabor**, pero se propagan otros estados: los estados de masa (ν_1, ν_2)

¿Conversiones de sabor de los neutrinos?

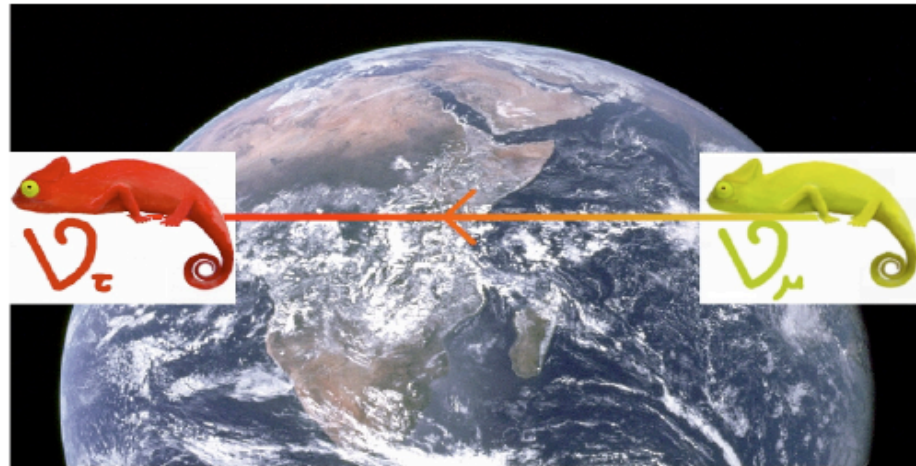
Se observa en ciertos experimentos que **los neutrinos cambian su naturaleza (sabor)** durante su propagación



Bruno Pontecorvo
(1913–1993)

Oscilaciones de sabor de los neutrinos

Neutrinos: partículas fantasma... y camaleónicas



Oscilación de sabor: Fenómeno intrínsecamente cuántico que necesita que los neutrinos **TENGAN UNA MASA** no nula (aunque pueda ser muy pequeña)



¡ No incluida en el Modelo Estándar de la Física de Partículas !

**Además del Sol y los rayos
cósmicos, ¿hay más
fuentes de neutrinos?**

¿De dónde vienen los neutrinos?

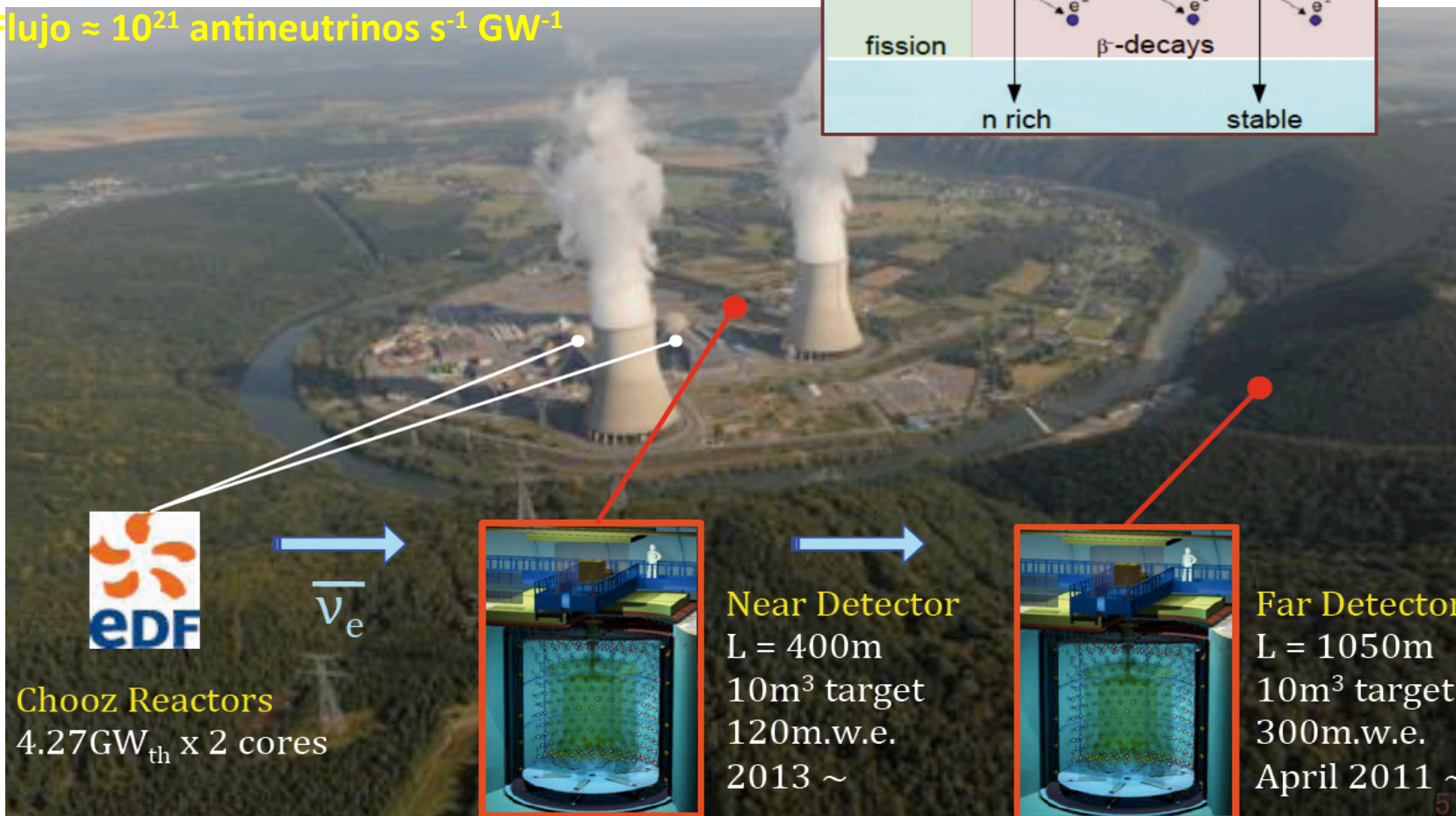
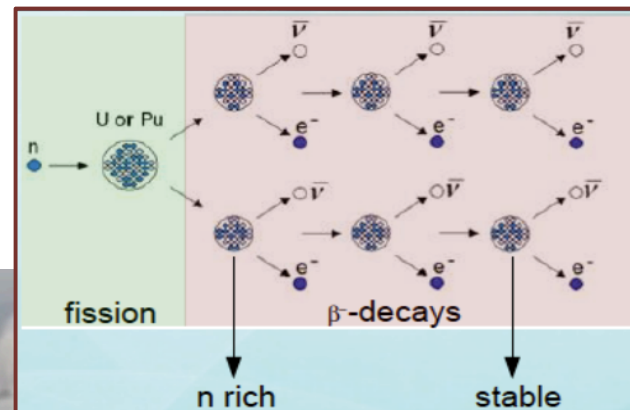
✓ Reactores Nucleares			Sol ✓
✓ Aceleradores de Partículas			Supernovas (Estrellas en explosión) SN 1987A ✓
✓ Atmósfera Terrestre (Rayos cósmicos)			Aceleradores en Fuentes Astrofísicas ✓?
✓ Corteza Terrestre (Radioactividad Natural)			Origen del Universo (Hoy $330 \nu/\text{cm}^3$) Evidencia Indirecta

Neutrinos de reactores nucleares

Reactores nucleares: fuente intensa de $\bar{\nu}_e$ de las desintegraciones de los fragmentos de la fisión

Cada reacción de fisión libera 200 MeV de energía y $6\bar{\nu}_e$

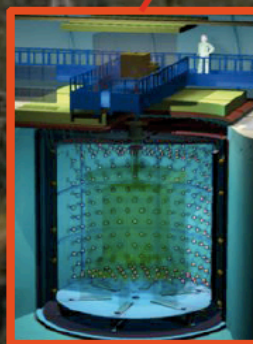
Flujo $\approx 10^{21}$ antineutrinos $s^{-1} GW^{-1}$



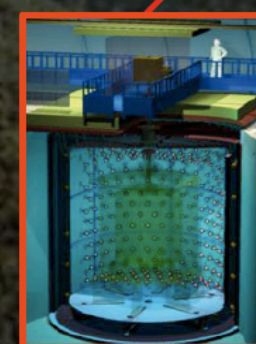
Ciemat
Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas



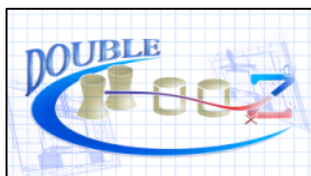
Chooz Reactors
 $4.27GW_{th} \times 2$ cores



Near Detector
L = 400m
10m³ target
120m.w.e.
2013 ~



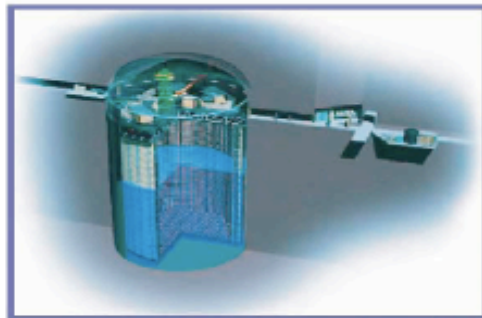
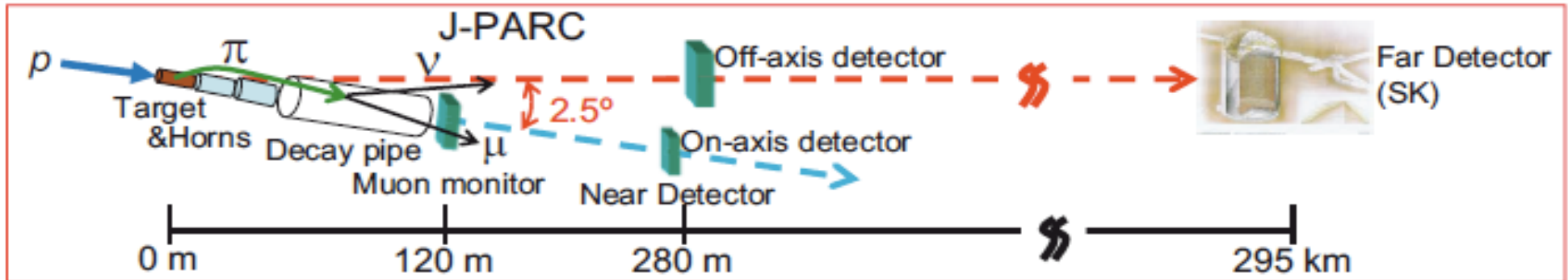
Far Detector
L = 1050m
10m³ target
300m.w.e.
April 2011 ~



Neutrinos de aceleradores

Neutrinos de energías intermedias creados en **aceleradores artificiales**.

Pero, **¿cómo se acelera una partícula sin carga eléctrica?**



Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)



295km

141°

T2K



J-PARC Main Ring
(KEK-JAEA, Tokai)

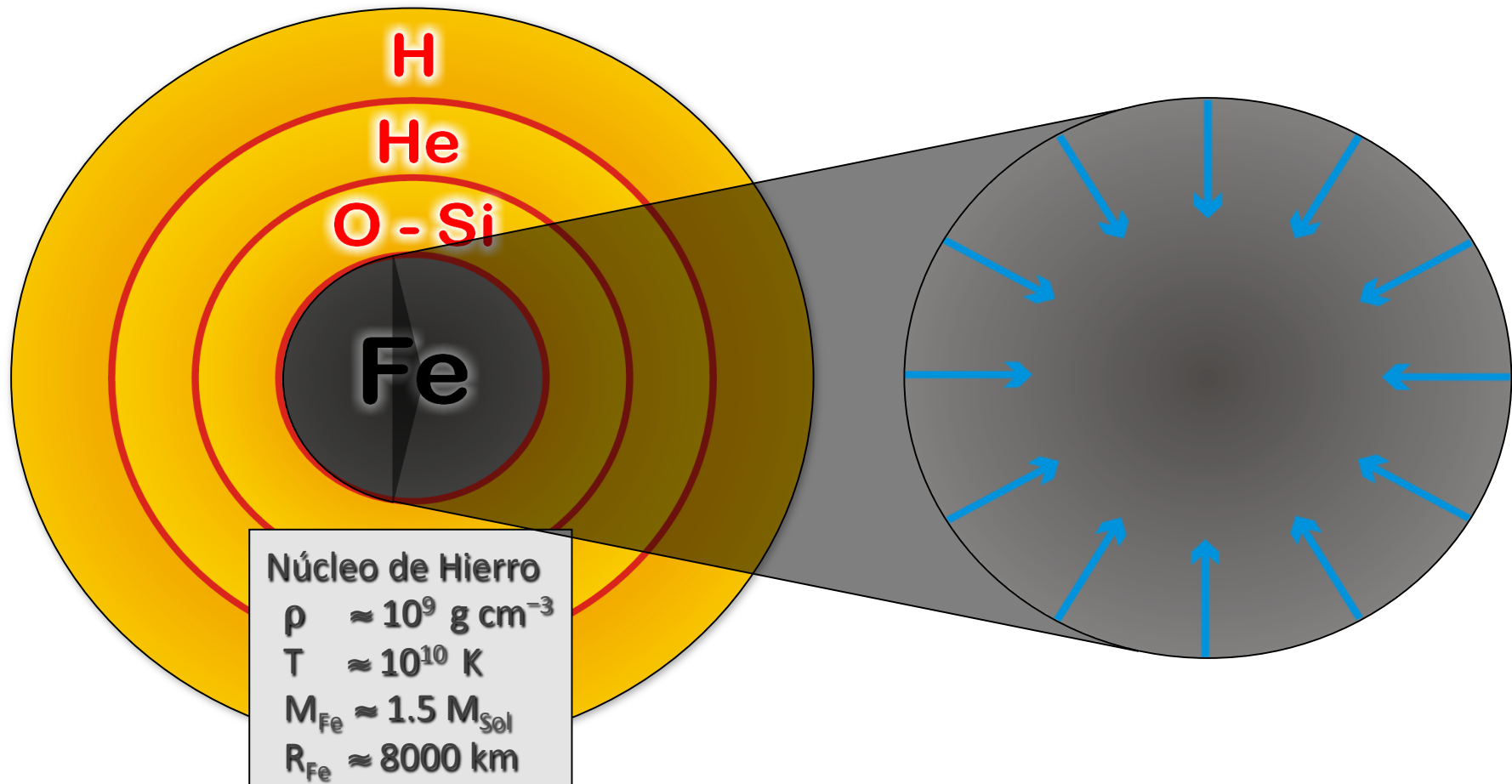


Neutrinos de Supernovas

Supernova: estado final de una estrella muy masiva que ha consumido casi todo el H

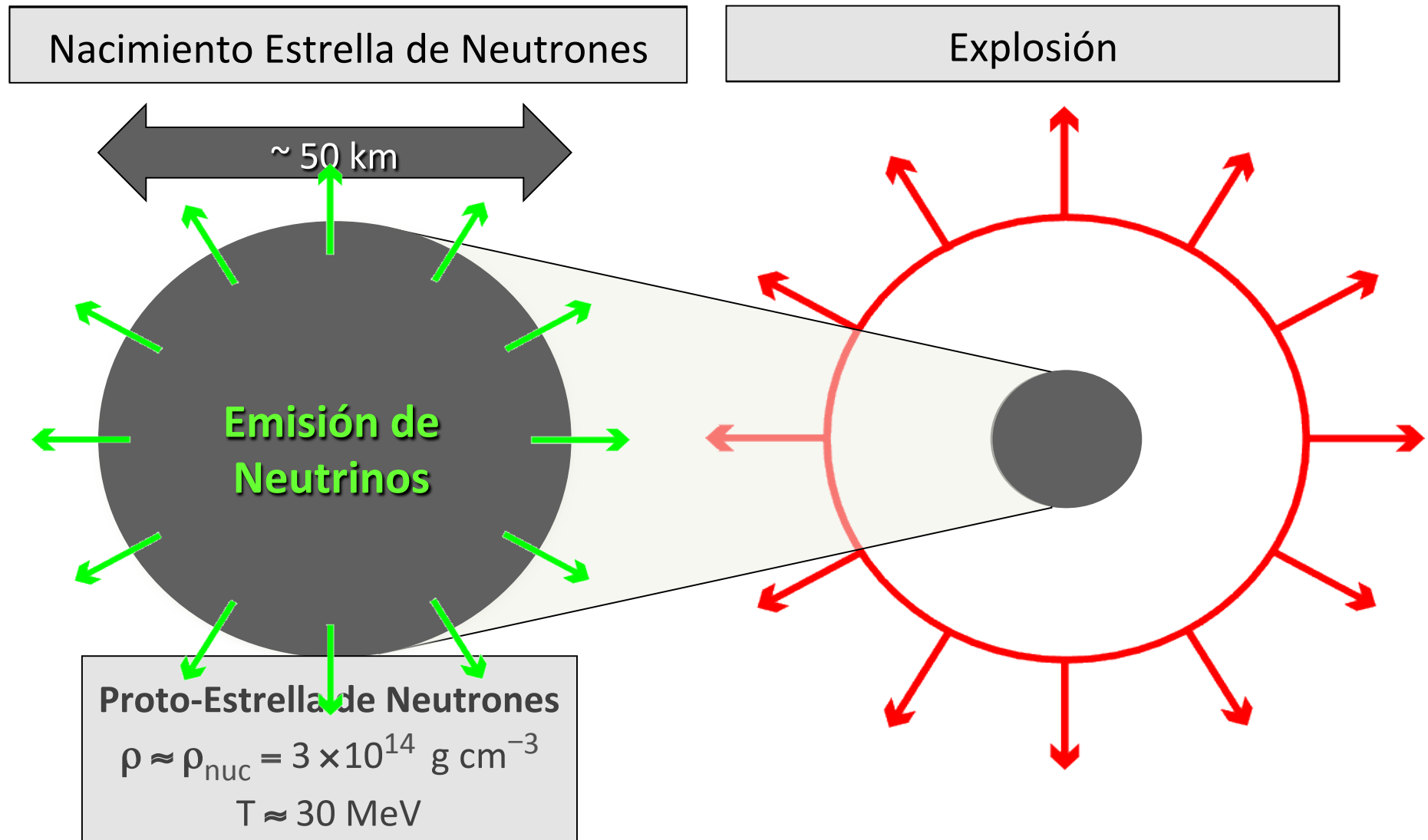
Estructura de “capas de cebolla”

Colapso (Implosión)



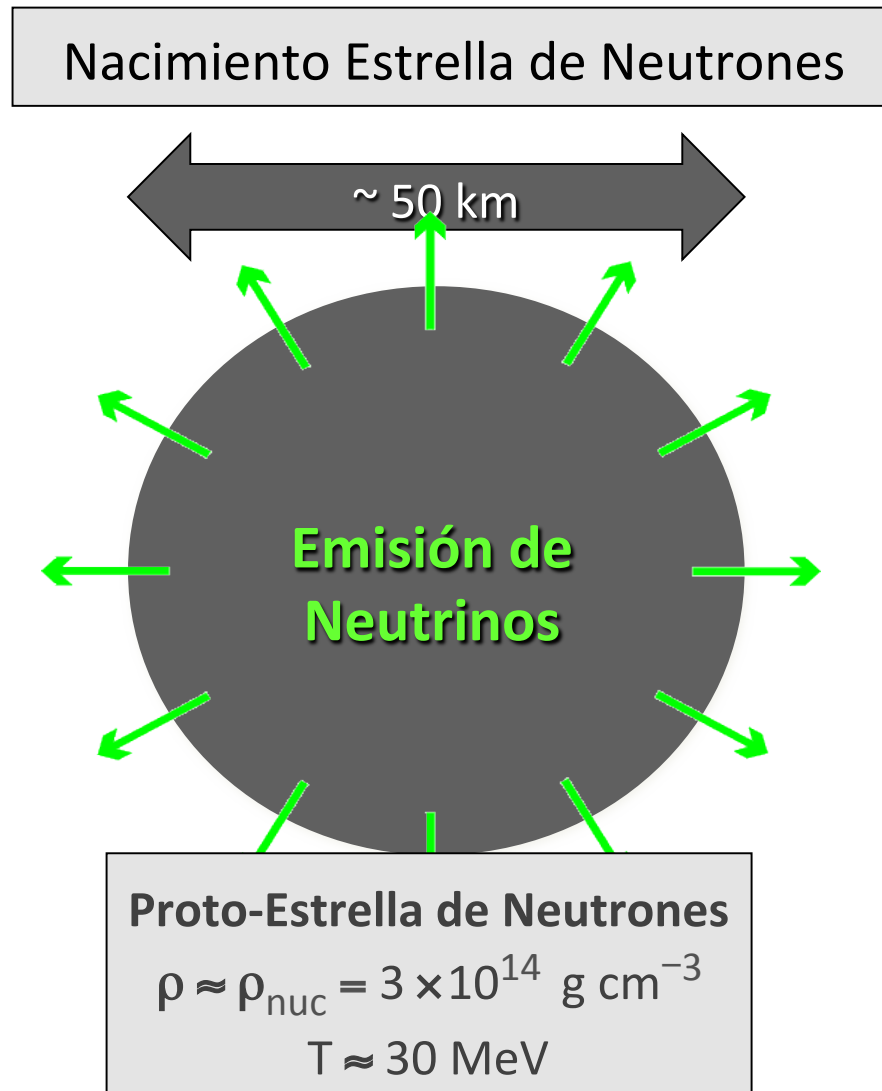
Neutrinos de Supernovas

Supernova: estado final de una estrella muy masiva que ha consumido casi todo el H



Neutrinos de Supernovas

Supernova: estado final de una estrella muy masiva que ha consumido casi todo el H



Energía de ligadura gravitatoria

$$E_g \approx 3 \times 10^{53} \text{ erg} \approx 17\% M_{\text{Sol}} c^2$$

Se libera en forma de

99% Neutrinos

1% Energía cinética de la explosión
(1% en radiación cósmica)

0.01% Luz, más brillante que la galaxia

Luminosidad en Neutrinos

$$L_\nu \approx 3 \times 10^{19} \text{ veces la del Sol}$$

Neutrinos de Supernovas

Primera medida de neutrinos de **una estrella distinta de nuestro Sol**:
confirma nuestra imagen general de **una explosión de Supernova**



Masatoshi Koshiya

Premio Nobel 2002

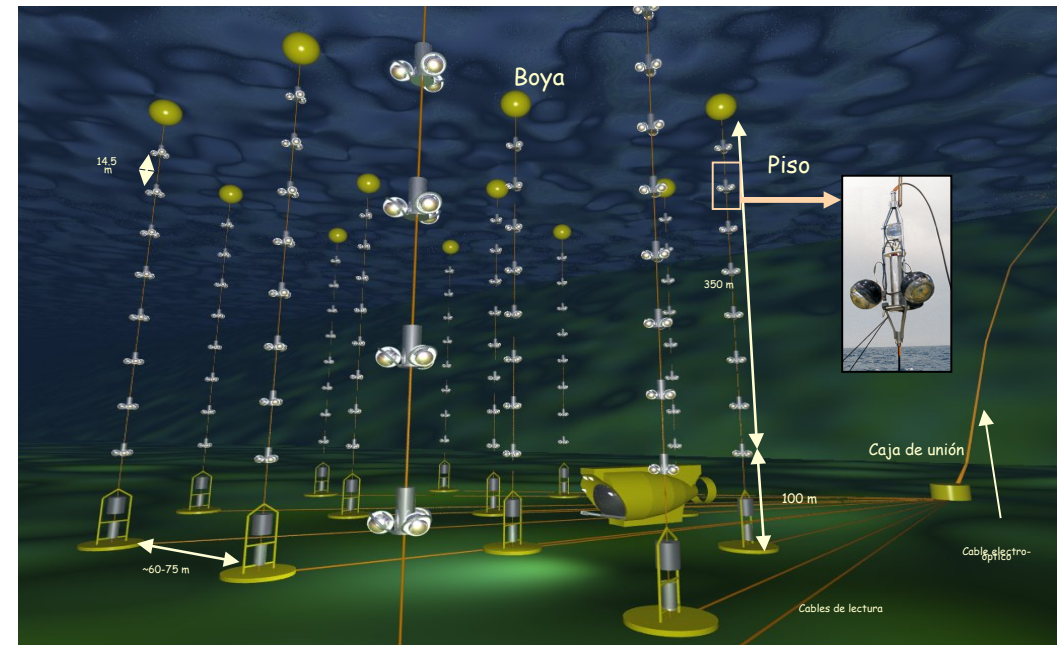
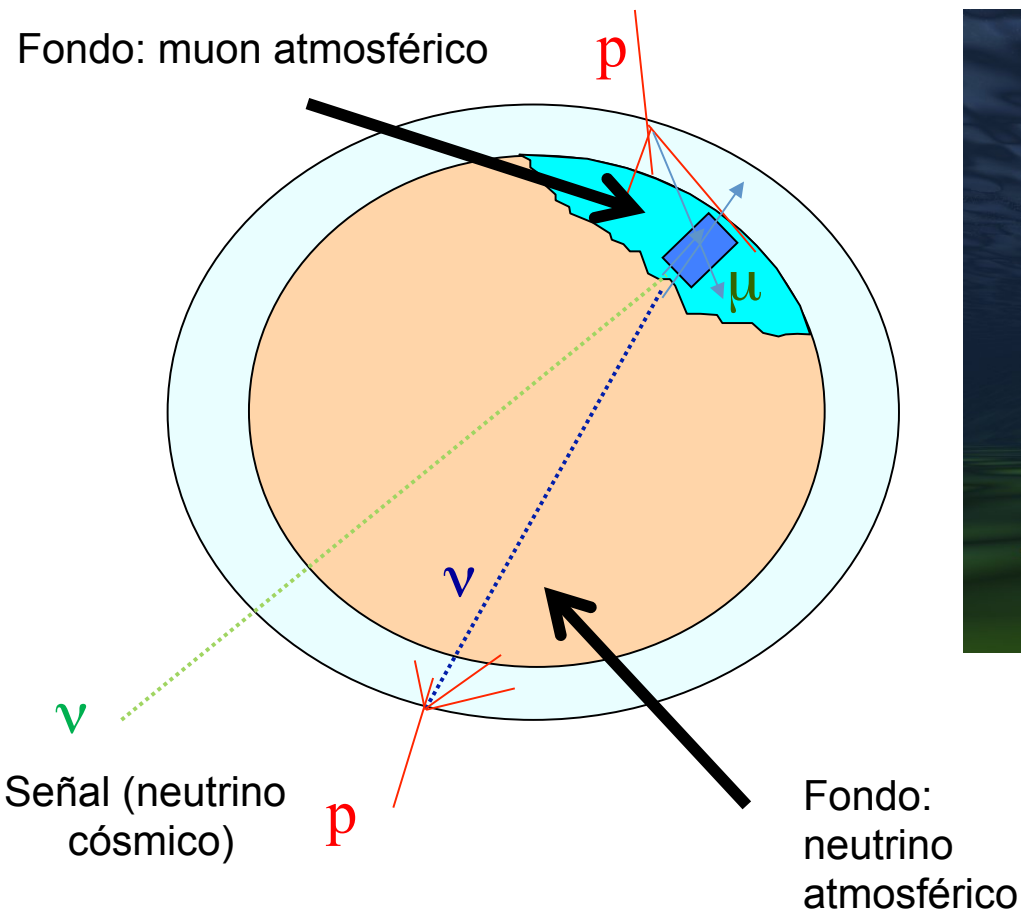
Por su papel pionero en
la detección de neutrinos
(Kamiokande)

Futuro (¿cuándo?): medida de **neutrinos de una SN en nuestra galaxia** con gran estadística.
Los detectores de neutrinos pueden “avisar” de la explosión con unas horas de adelanto
(**SuperNova Early Warning System**)

Neutrinos cósmicos de alta energía

Originados en las fuentes o la propagación de los **rayos cósmicos de alta energía**

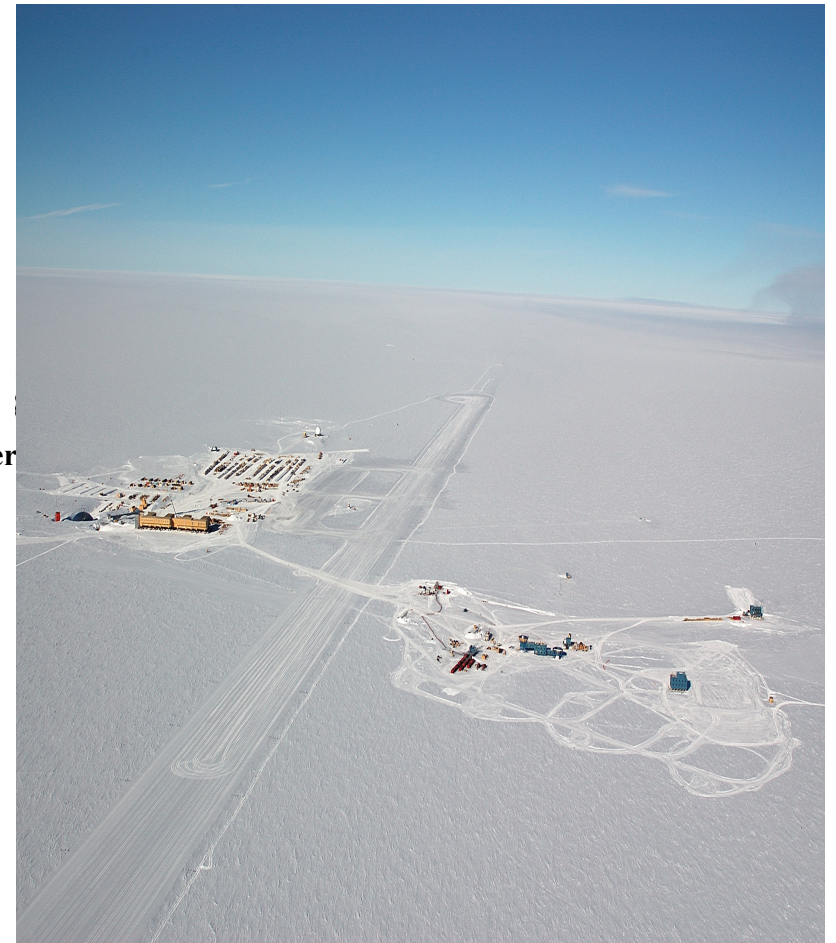
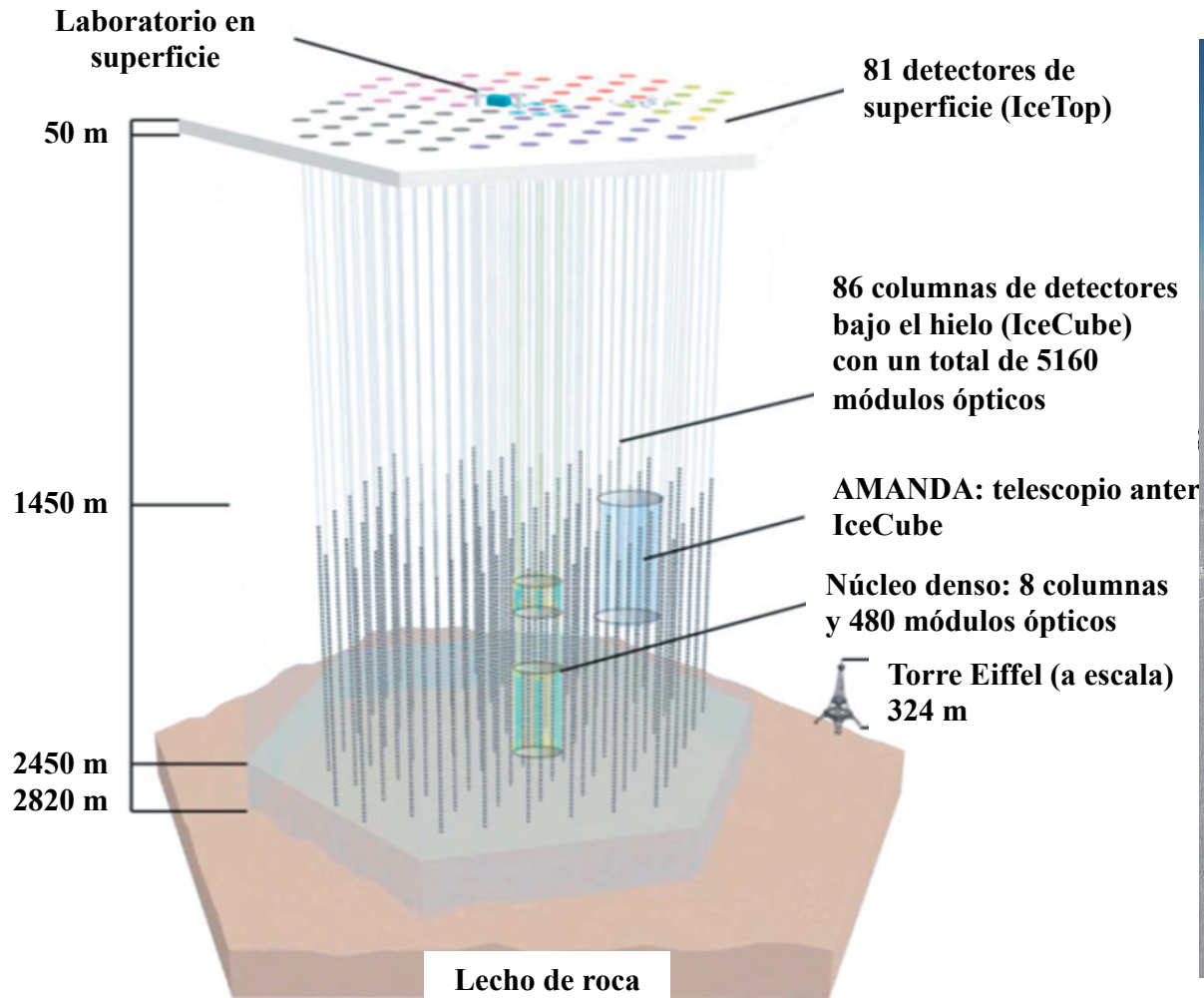
Los neutrinos “*apuntan*” a la fuente: **telescopios de neutrinos**



ANTARES: telescopio de neutrinos submarino

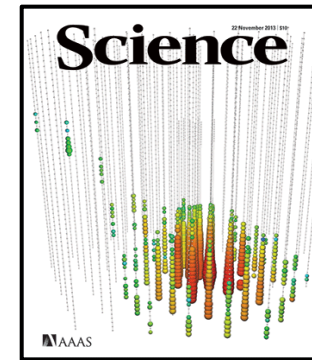


Icecube: un telescopio de neutrinos en el polo sur



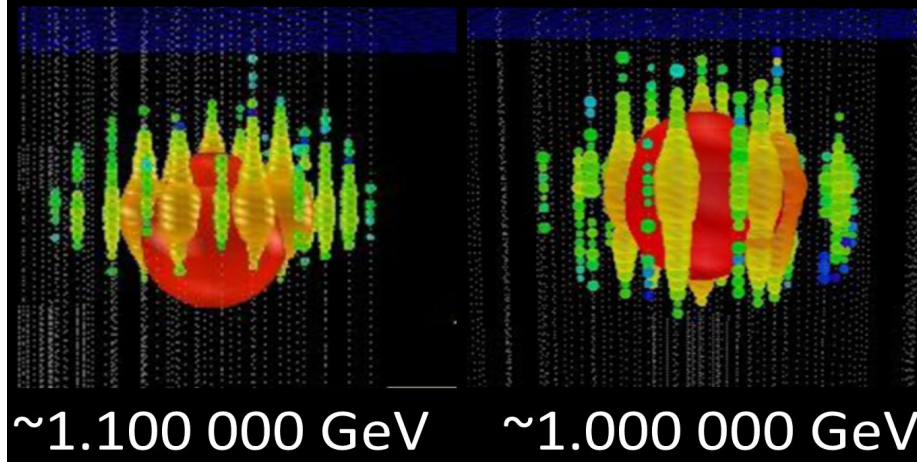
Icecube: un telescopio de neutrinos en el polo sur

2013: primera detección de neutrinos astrofísicos de alta energía. Comienzo de la astronomía de (con) neutrinos



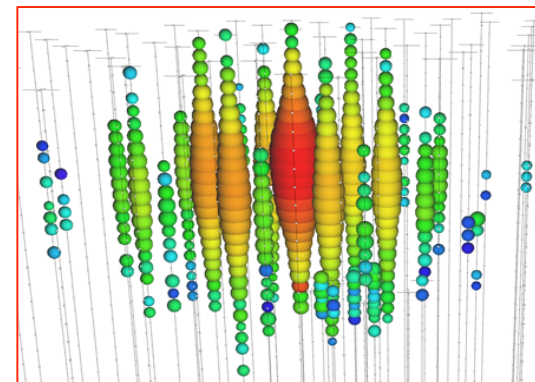
Ernie (Epi)

Bert (Blas)



~1.100 000 GeV

~1.000 000 GeV



Paco Pico (2014): 2 PeV



¿Existen neutrinos más energéticos que Epi y Blas?

Neutrinos cosmogénicos: energías del orden de 10^{20} eV. Llegan a la Tierra en un número extraordinariamente bajo y son muy difíciles de detectar

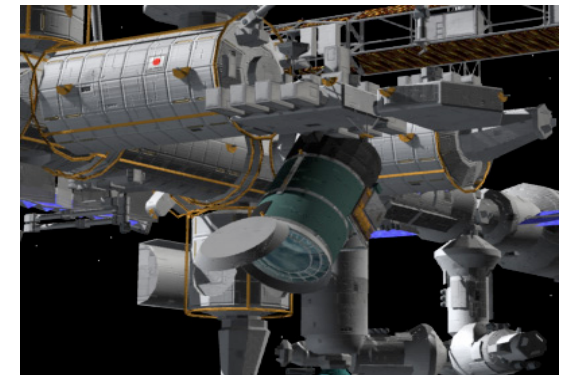
Se busca su señal en:

En superficie, con **conjuntos de detectores de rayos cósmicos:**

Observatorio Pierre Auger
(3000 km²)



En el espacio, con un **telescopio** de campo ancho:



JEM-EUSO

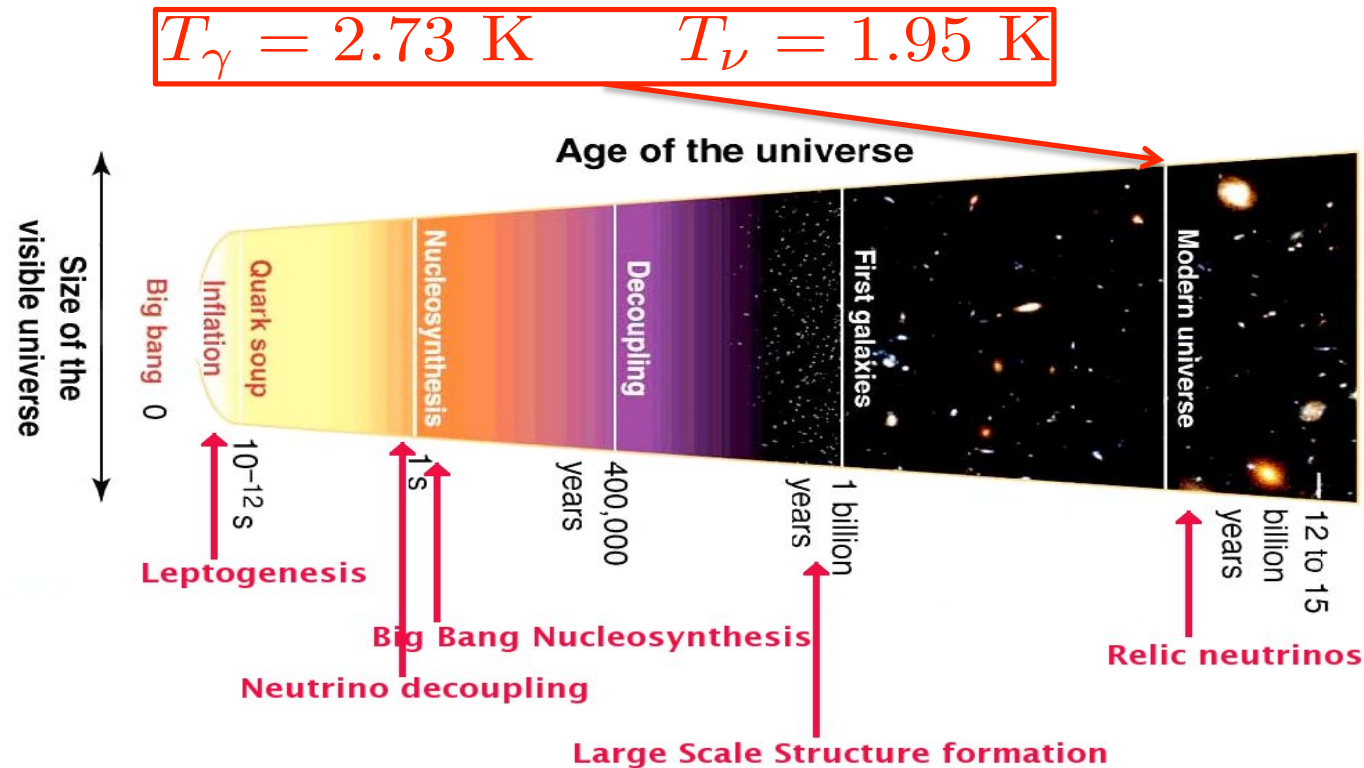


+ otras instituciones esp.

**“Pesando” neutrinos
(¿cuál es su masa?)**

El Fondo Cósmico de Neutrinos (FCN)

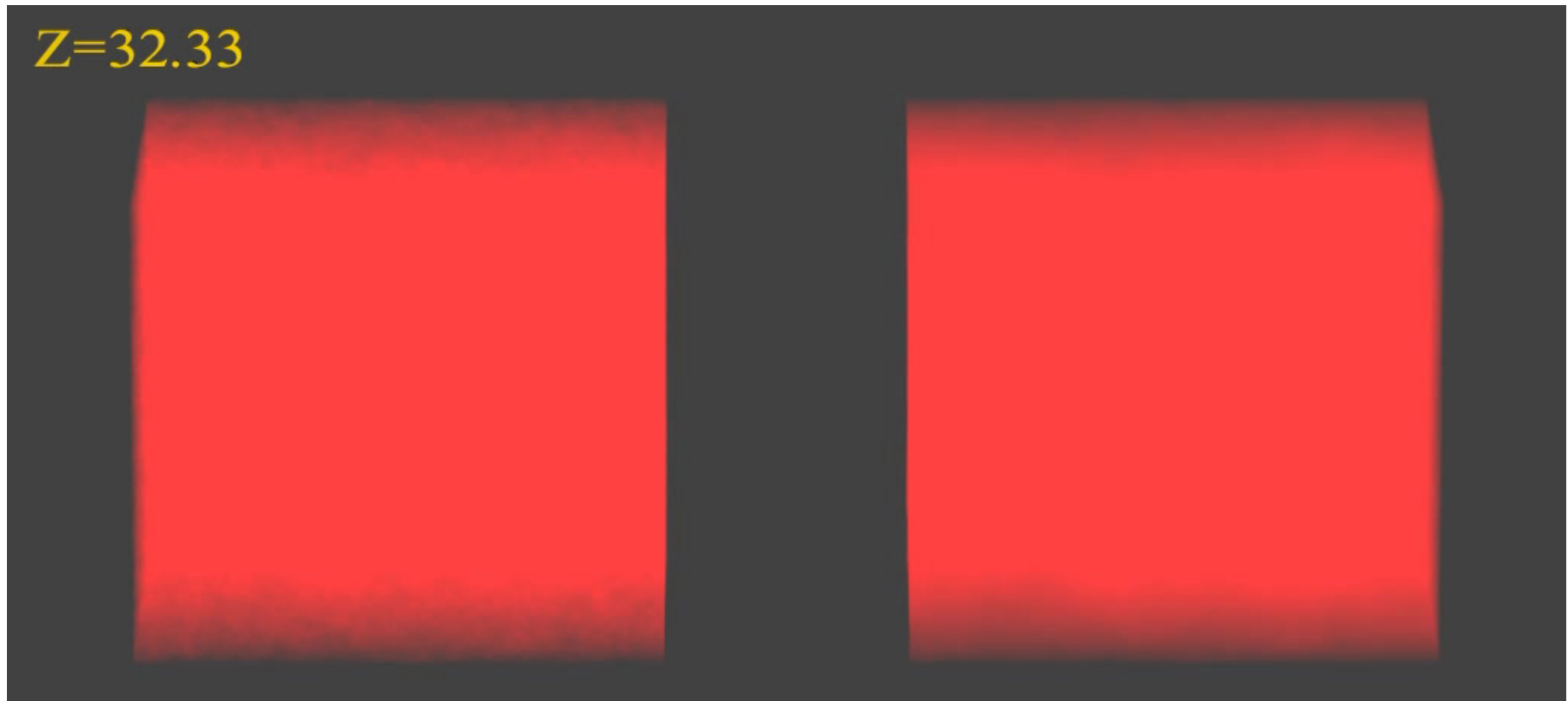
Son los neutrinos creados durante las primeras etapas del Universo



Detección directa del FCN: quizás el más ambicioso reto experimental

El Fondo Cósmico de Neutrinos

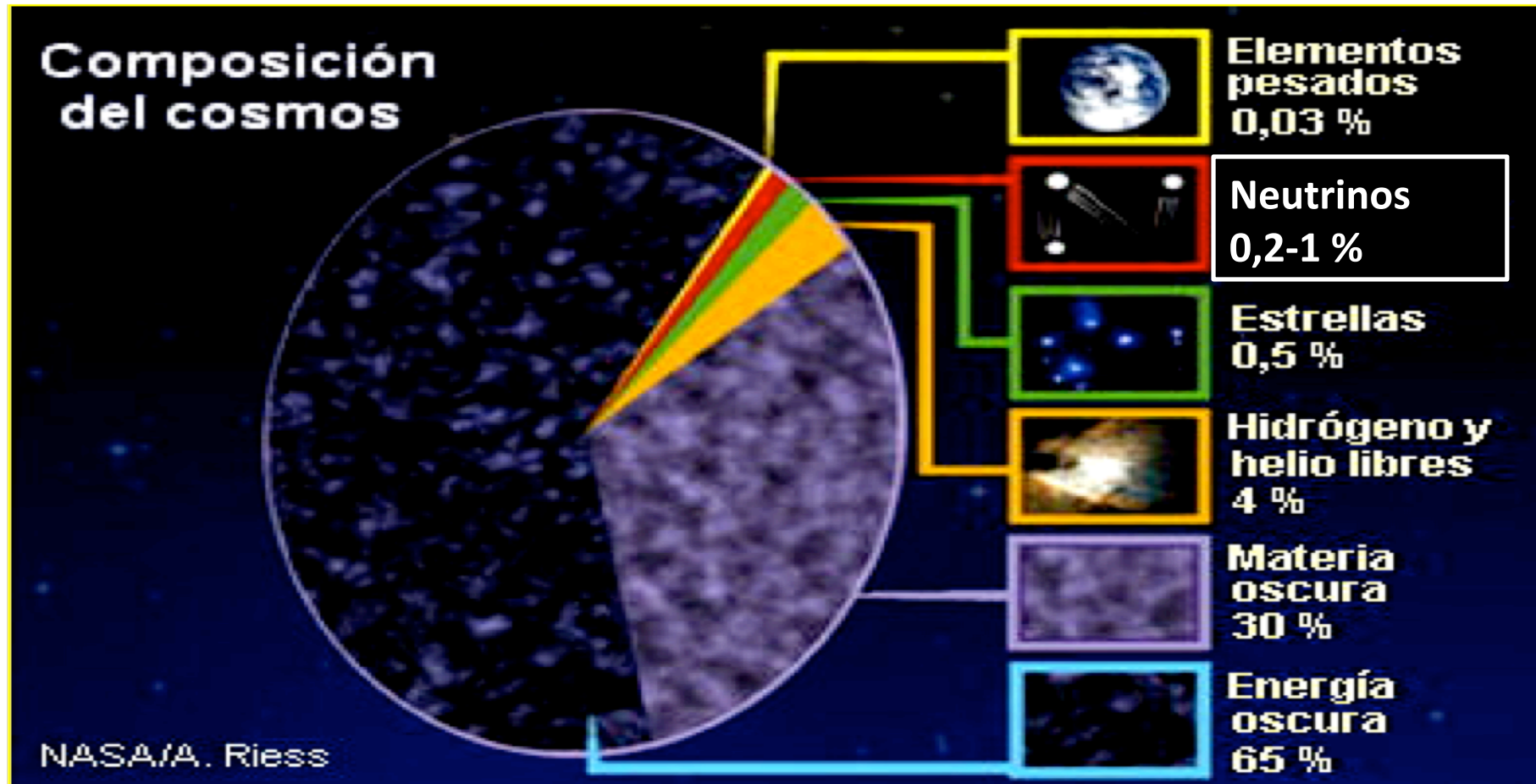
A través de la comparación con **datos cosmológicos** (anisotropías del CMB, distribución de las estructuras a gran escala,..), se puede hallar información sobre las propiedades de los neutrinos del **FCN**.



Simulación de la **formación de grandes estructuras** en el Universo

El Fondo Cósmico de Neutrinos

Masa de los neutrinos < 5 diezmillonésimas de la masa del electrón



Composición actual del Universo



Desintegración β doble sin neutrinos

Tratará de medir desintegración radioactiva **MUY rara**
(¡ocurriría en promedio sólo una vez cada 10^{26} años!)

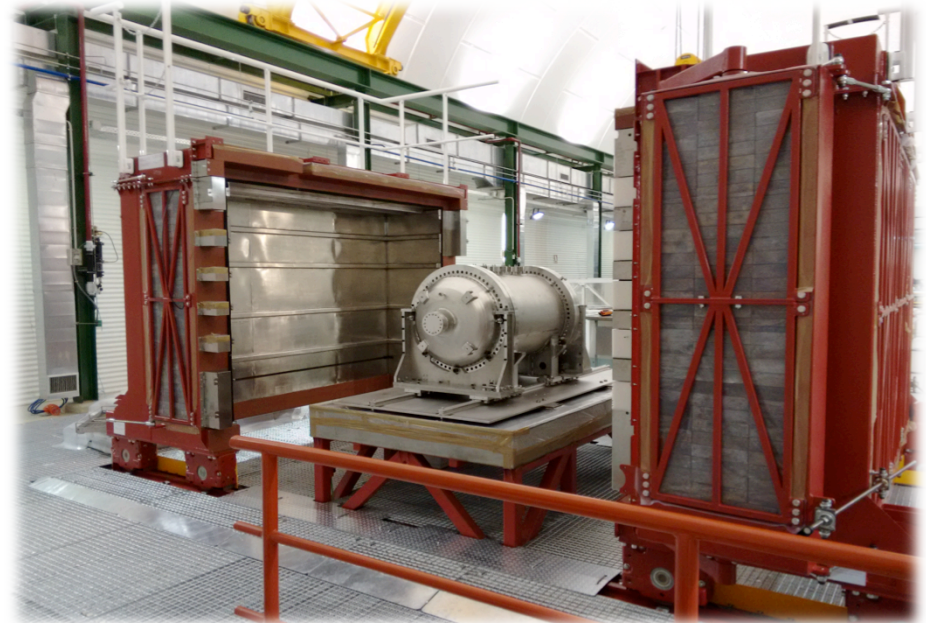


Desintegración β doble

Sensible a la **masa** y la **naturaleza** de los neutrinos (¿son su propia antipartícula?)



Ettore
Majorana



+ otras instituciones esp.



Física subterránea

Next se está instalando en el **Laboratorio Subterráneo de Canfranc**, en los Pirineos



Todo eso está muy bien, pero...

¿para qué sirven los neutrinos?

Monitorización de reactores nucleares

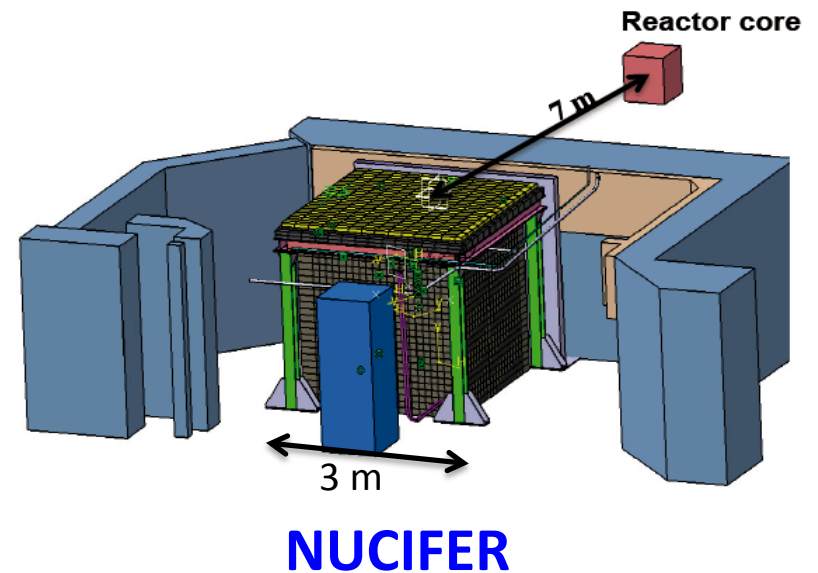


Reactores nucleares: fuente intensa de $\bar{\nu}_e$ de las desintegraciones de los fragmentos de la fisión

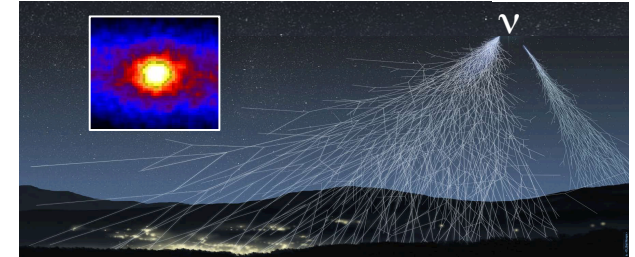
Flujo $\approx 10^{21}$ antineutrinos s^{-1} GW^{-1}

Aplicación en desarrollo: *monitorizar* reactores con detectores de neutrinos relativamente pequeños (**no proliferación**). Control de la Agencia Internacional para la Energía Atómica (IAEA)

Los detectores podrían proporcionar medidas **continuas, no invasivas y automáticas** (p.ej. control de la **producción y extracción de plutonio**)



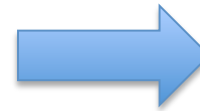
Conclusiones



★ Los **neutrinos** son partículas abundantes pero elusivas: merecen ser calificadas de **FANTASMAS**

★ Son importantes para la **Física de Partículas** (información más allá del Modelo Estándar), la **Astrofísica** (fuentes de neutrinos) y la **Cosmología** (evolución del Universo)

QUEREMOS SEGUIR
DETECTANDO **NEUTRINOS**





**Muchos más
detalles en...**

Los neutrinos

Libro de la colección **¿Qué sabemos de...?**

Publicado por CSIC-Catarata, Oct 2014

ISBN 978-84-8319-946-6